This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

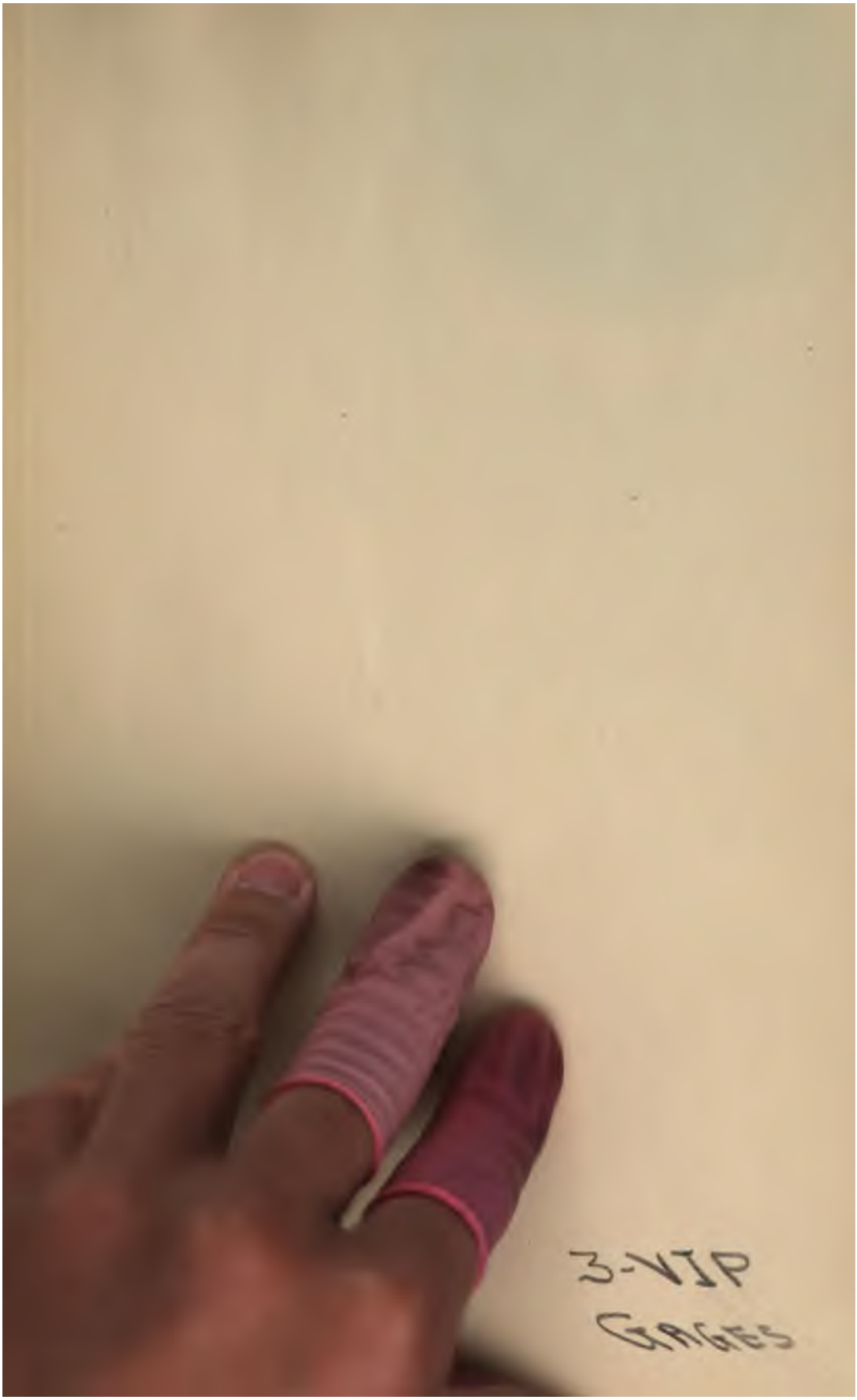
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

3 3433 06637964 9


3-VIP
GARGES

TRAITÉ

DE

MÉTALLURGIE DU FER

TRAITÉ

DE

MÉTALLURGIE DU FER

Tous droits de traduction et de reproduction réservés.

TRAITÉ

DE

MÉTALLURGIE DU FER

TOME DEUXIÈME

TRAVAIL DES MÉTAUX

PAR

LÉON GAGES

Capitaine d'Artillerie,
Ancien élève de l'École Polytechnique,
Ex-professeur à l'École d'application de l'Artillerie et du Génie.

Avec 244 gravures dans le texte

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE

J. FRITSCH, ÉDITEUR

30, Rue Jacob, 30

1898

NEW YORK PUBLIC LIBRARY

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
106353
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
1899

AVANT-PROPOS

Nous nous proposons d'étudier dans cette deuxième partie de notre traité de métallurgie le travail auquel on soumet les métaux ferreux.

Il y aurait lieu de reproduire à nouveau les observations que nous avons déjà faites en tête de notre première partie au sujet de la manière dont nous traiterons cet important sujet. Laissant de côté les détails de fabrication essentiellement variables d'une usine à une autre, nous nous attacherons exclusivement à mettre en lumière les *principes généraux* qu'une longue expérience et qu'une sage observation des faits ont permis de consacrer.

Il semble de prime abord qu'il eût été plus exact d'intituler cette deuxième partie : *Travail des métaux à chaud* », car nous nous bornerons à des indications d'une grande généralité sur le *travail à froid*. Ce dernier genre de travail n'est, en effet, le plus ordinairement exécuté que pour amener des *modifications de forme* dans les métaux traités, et alors on entre dans le domaine des procédés purement mécaniques qui ne relèvent plus d'une étude métallurgique à proprement parler.

Cependant certains travaux à froid (mandrinage, tréfilage, étirage, etc...) produisent, en dehors des changements de forme, *des modifications profondes dans la nature même du métal*, soit parce qu'on adopte intentionnellement ce genre de travail pour les provoquer, soit parce qu'en les exécutant on ne peut les éviter. Il est clair qu'un pareil sujet ressortit à la métallurgie ; aussi ne craindrons-nous pas d'en parler avec quelques détails.

Nous devons donc laisser au titre de cette étude un certain caractère de généralité.

Pour ce qui concerne la description des engins ou appareils de transformation, nous ne saurions nous y appesantir sans empiéter dans le domaine de la mécanique. Il n'en sera question d'une manière détaillée

que lorsque ce sera absolument nécessaire pour saisir à fond l'opération métallurgique étudiée.

Les matières traitées dans le tome II se subdivisent comme il suit :

Préliminaires. — La mesure des hautes températures.
Titre I. — Travail de la fonte. — Le moulage.
Titre II. — Introduction à l'étude du travail de l'acier. Le lingot.
Titre III. — Travail de l'acier. — La pratique et la théorie.
Titre IV. — Etude des propriétés des divers aciers. — Les théories finales.

PRÉLIMINAIRES

LA MESURE DES HAUTES TEMPÉRATURES

Le travail des métaux ferreux (*fontes*, *fers* et *aciers*) exige des températures très élevées ; nous verrons dans le cours de cette étude combien il est important de savoir les apprécier.

Article 1er. — Méthodes fondées sur les propriétés des gaz.

Ces méthodes sont les seules qui paraissent actuellement susceptibles de donner une évaluation directe de la température dans l'échelle thermodynamique.

Les lois auxquelles les gaz obéissent sont relativement simples, bien connues et se vérifient de mieux en mieux au fur et à mesure que leur température s'élève, puisqu'ils se rapprochent de plus en plus de ce qu'on est convenu d'appeler *l'état gazeux parfait*.

Inapplicables le plus souvent dans l'industrie, ces méthodes plutôt théoriques offrent néanmoins un grand intérêt, car les *pyromètres industriels* doivent être, en général, préalablement étalonnés à l'aide d'un certain nombre de points fixes déterminés avec les thermomètres à gaz.

A. — *Le thermomètre à air*. — Cet appareil, employé dans les recherches de physique pour les températures très élevées, est le seul qu'on prétend être fondé sur la *définition scientifique de la température* ; il est malheureusement, comme on l'a dit ci-dessus, d'une application difficile dans l'industrie.

A une température élevée le verre se ramollit et il faut donner au thermomètre d'autres enveloppes. Pour le rendre plus maniable on le constitue par une boule en fer, en platine ou en porcelaine, mise en communication par un tube assez long et de petit diamètre avec un manomètre métallique. La boule sera placée dans l'enceinte dont on veut

mesurer la température et le tube sera refroidi au besoin pour que l'air arrive froid au manomètre.

Tous les métaux devenant perméables aux gaz vers 600°, ainsi qu'il résulte des expériences de MM. *H. Sainte-Claire Deville et Troost* (1), il faudra, à partir de cette température, avoir exclusivement recours aux réservoirs en porcelaine. On a pu ainsi mesurer couramment des températures voisines de 1400°, mais à la condition de renouveler fréquemment ces réservoirs, la porcelaine finissant par s'altérer.

L'emploi des réservoirs en porcelaine exige la connaissance du coefficient de dilatation cubique aux hautes température de cette substance; or, on ne le connaît qu'avec une certaine approximation. D'après MM. *H. Sainte-Claire Deville et Troost*, la porcelaine de *Bayeux* notamment, très souvent employée, éprouve une dilatation permanente par suite d'une vitrification partielle, quand elle est chauffée au blanc, sans que son coefficient normal soit sensiblement changé. De 1000 à 1400°, ce coefficient se maintient entre 0,0000160 et 0,0000170 ; vers 1500°, il monte à 0,0000200 et se rapproche de la dilatation du verre.

Le volume du thermomètre à gaz étant assez considérable, quand on le place dans une enceinte chauffée, il est difficile de savoir si tous ses points sont à une température uniforme et surtout si l'objet qu'on lui compare est rigoureusement à la même température.

Il importe aussi de remarquer que cet appareil ne s'appuie pas exclusivement sur les propriétés des gaz mais encore sur celles des solides, puisqu'il comprend une enveloppe de métal ou de porcelaine dont il faut connaître la dilatation. Or les solides obéissent sous ce rapport à des lois complexes et mal connues ; de plus, l'accroissement de température fait subir à ces corps des changements très profonds et souvent permanents.

Les efforts des physiciens tendent aujourd'hui à la recherche d'une méthode nouvelle fondée, bien entendu, sur les propriétés des gaz, mais complètement indépendante de la nature et des dimensions de l'enveloppe thermométrique, de manière qu'on puisse obtenir des indications directes dans l'échelle thermodynamique au delà des points de ramollissement ou de fusion des corps solides.

Les traités de physique donnent la description détaillée des méthodes employées pour arriver à la mesure des températures à l'aide du ther-

(1) *Annales de physique et chimie*, 3e série, t. LVIII, page 257 ; 1860.

mômètre à air. Il ne nous appartient pas de les exposer : des trois méthodes dues à *Regnault* ou perfectionnées par lui, nous pensons que la meilleure est celle qui est fondée sur la *dilatation de l'air sous volume constant*.

B. — *Méthode indiquée par M. Daniel Berthelot.* — Les expériences des physiciens modernes ont fait voir :

« *Que la réfraction d'un gaz, c'est-à-dire l'excès* $n - 1$ *de l'indice sur l'unité, varie exactement comme la densité, soit que l'on modifie cette densité par un changement de pression, soit qu'on la modifie par un changement de température.* C'est là une extension de la loi si connue de *Gladstone*.

En rapprochant les deux séries d'expériences faites, soit en ce qui concerne la variation de pression, soit en ce qui concerne la variation de température, on conclut « *qu'à une densité donnée d'un gaz correspond toujours un même indice* », la température et la pression pouvant être différentes.

Cette relation est indépendante de la forme même de la fonction qui lie l'indice et la densité.

Tel est le principe sur lequel s'appuie la méthode nouvelle proposée par M. *Daniel Berthelot* et dont la description détaillée a été récemment donnée par le *Journal de physique*.

Au moyen d'un appareil interférentiel on décompose un faisceau lumineux en deux parties qui traversent deux tubes remplis d'un même gaz ; on note la position initiale des franges.

L'un des tubes est porté à la température qu'il s'agit de mesurer, la pression du gaz qu'il contient restant égale à la pression atmosphérique. La densité du gaz diminuant, les franges se déplacent ; on diminue alors la pression dans le second tube jusqu'à ce que les franges soient revenues à leur position primitive.

Supposons pour simplifier le raisonnement que la longueur des deux tubes à ce moment soit la même : les franges étant revenues au zéro, la densité du gaz est la même dans les deux tubes. Or, on connaît la pression et par suite la densité du gaz dans le tube froid, on connaît donc la densité du gaz chaud et l'on *en déduit la température*. La description ci-dessus concerne le *thermomètre interférentiel à gaz à pression constante*.

On peut réaliser un *thermomètre interférentiel à gaz à densité cons-*

tante en ramenant les franges, non par diminution de la pression dans le tube froid, mais par augmentation de la pression dans le tube chaud. Dans ce cas, le tube froid devient inutile et peut être supprimé.

Cette méthode, déjà mise en œuvre, paraît appelée à rendre de grands services dans l'évaluation des températures élevées, malgré les difficultés qu'on rencontre dans son emploi.

Article 2. — Méthodes fondées sur les propriétés des solides

Il existe un grand nombre de pyromètres fondés sur la différence de dilatation de deux matières solides ; ils sont plus simples que les pyromètres à air mais ils ne peuvent servir à la mesure des températures très élevées parce que la constitution des métaux s'altère lorsqu'ils sont soumis à des alternatives de chauffage et de refroidissement et, dès lors, leur dilatation devient irrégulière.

Nous citerons, et pour mémoire seulement :

Le pyromètre graphite (tube de fer et bâton de graphite) ;
Le pyromètre cuivre et acier (tube de cuivre et tige d'acier) ;
Etc., etc...

Les *pyromètres d'argile* donnent une approximation beaucoup trop grossière pour qu'on puisse s'y rapporter.

I. — *Moyens pyroscopiques.*

On en était donc réduit, depuis de longues années, dans les usines sidérurgiques, à apprécier les hautes températures qui y sont développées à l'aide de certains caractères extérieurs.

A. — *Couleurs de chauffage.* — Le procédé pyroscopique grossier employé le plus souvent consiste à juger de la température des métaux en traitement par leur éclat plus ou moins vif.

L'intensité des radiations lumineuses émises par les corps incandescents, soit leur éclat, croît avec la température ; cette intensité croît inégalement pour les radiations de longueurs d'onde différentes, la nuance des corps varie donc aussi avec la température. On peut des

mesures d'éclat ou des mesures de nuance, chercher à déduire une estimation de la température.

J. *Prinsep* employa, dès 1827, un thermomètre à air avec réservoir en or pour évaluer quelques températures importantes. Il fixa celle du rouge à 650° et celle de la fusion de l'argent à 1000° environ.

Après de remarquables recherches sur les hautes températures à l'aide d'un thermomètre à air et à réservoir en platine, *Pouillet* dresse, en 1836, une table des températures correspondant aux différents éclats.

« *En observant avec attention les nuances de couleurs correspon-*
« *dantes aux indications du pyromètre à air, on a cru pouvoir, sans*
« *trop s'éloigner des acceptions reçues, faire correspondre une nuance*
« *distincte à chaque centaine de degrés, comme l'indique le tableau*
« *suivant :* Pouillet, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1836.

Rouge naissant	525°
Rouge sombre.	700°
Cerise naissant.	800°
Cerise	900°
Cerise clair	1000°
Orangé foncé	1100°
Orangé clair	1200°
Blanc	1300°
Blanc éclatant	1400°
Blanc éblouissant	1500° à 1600°

Un observateur très exercé et opérant toujours dans les mêmes conditions, surtout en ce qui concerne l'éclairement extérieur, peut arriver à obtenir des résultats comparables dans cette appréciation à vue.

Quoique fort imparfait, il importe de ne pas oublier que ce procédé règne encore en maître dans les usines et qu'il n'est pas près de disparaître, malgré la perfection de plus en plus grande des nouveaux appareils pyrométriques dont il sera question plus loin. Les résultats qu'il procure sont, la plupart du temps, suffisants pour le plus grand nombre des opérations métallurgiques pratiquées par un personnel relativement permanent exercé depuis longtemps et sur des nuances de métal généralement en nombre assez restreint.

Le tableau de *Pouillet*, encore en usage aujourd'hui dans les usines, a été légèrement modifié et complété comme il suit :

DÉNOMINATIONS	ABRÉVIATIONS	TEMPÉRATURES
Etain fondant	»	230°
Plomb fondant	»	320
Bois glissant	BG	350
Bois fumant.	BF	400
Zinc fondant	»	430
Bois brûlant	BB	450
Rouge sombre naissant . . .	RSN	500
Rouge sombre naissant avancé .	RSNA	550
Rouge très sombre	RTS	600
Rouge sombre	RS	650
Rouge sombre avancé . . .	RSA	700
Rouge sombre très avancé . .	RSTA	750
Rouge cerise naissant. . . .	RCN	800
Rouge cerise sombre	RCS	850
Rouge cerise	RC	900
Rouge cerise clair	RCC	950
Rouge cerise très clair . . .	RCTC	1000
Jaune orangé	JO	1050
Jaune.	J	1100
Jaune clair	JC	1150
Jaune très clair	JTC	1200
Blanc	B	1300
Blanc soudant	BS	1400
Blanc éblouissant	BE	1500

B. — *Alliages fusibles.* — Le procédé des alliages fusibles a été longtemps et est encore quelquefois employé en métallurgie. Il consiste à rechercher si la température à évaluer est inférieure ou supérieure à celle de la fusion d'un métal ou d'un alliage connus.

On emploie à cet effet une série de fragments de métaux ou d'alliages rangés dans l'ordre de leur fusibilité. Que l'un de ces fragments, placé dans l'enceinte dont on veut évaluer la température ou au contact du métal chauffé, résiste et que celui qui vient après lui dans la série fonde, on en déduira que la température de l'enceinte ou du métal est comprise entre les températures de fusion de ces deux corps.

Jusqu'à 1000° environ, les métaux simples (étain, plomb, zinc, argent, cuivre) fournissent des points de repère fixes. On peut combler

les lacunes en intercalant des alliages d'étain et de cuivre, de plomb et d'argent, etc...

Au delà de 1000°, il faut recourir aux alliages d'argent ou d'or avec le platine.

Hâtons-nous de dire, sans entrer dans de plus longs détails, combien ce procédé est peu précis, car l'on connaît la facilité de liquation de la plupart de ces alliages.

II. — *Appareils industriels.*

Aucun des procédés pyroscopiques décrits ci-dessus ne fournit des résultats suffisamment précis ; or, il est aujourd'hui nécessaire, pour certains traitements métallurgiques, d'opérer entre des limites de température très resserrées.

De là, la création d'appareils spéciaux, véritables pyromètres pratiques, dont l'emploi finira par se vulgariser dans les usines.

Nous décrirons :

1° La lunette polarimétrique de MM. Mesuré et Nouel ;

2° Le pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier ;

3° Le pyromètre optique de M. H. Le Chatelier.

1° LUNETTE POLARIMÉTRIQUE DE MM. MESURÉ ET NOUEL.

La lunette polarimétrique de MM. Mesuré et Nouel, ingénieurs de la Compagnie des forges de Châtillon et Commentry, est fondée sur les phénomènes de la polarisation rotatoire dont nous allons rappeler les principes.

A. — *Rappel des principes de la polarisation rotatoire.* — Une lame d'un cristal à un axe quelconque, taillée perpendiculairement à cet axe, ne dédouble point les rayons polarisés qui la traversent normalement. Ces rayons conservent leur plan de polarisation et toutes leurs propriétés primitives, comme si la lame n'était pas cristallisée.

Arago découvre en 1811 que le quartz fait exception à la loi énoncée ci-dessus. *Biot* reconnaît plus tard que beaucoup d'autres corps jouissent de la même propriété.

Ces préliminaires posés, définissons le phénomène en prenant une lame de quartz taillée comme on va le dire.

(*a*) — *Définition du phénomène.* — Lorsqu'une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique est placée entre deux prismes de *Nicol* dont les sections principales font un angle de 90°, un rayon de lumière monochromatique traversant le premier *Nicol* dit *polariseur* et observé à travers le second dit *analyseur* n'est pas éteint comme cela avait lieu avant l'interposition de la lame de quartz. Le rayon traverse en partie l'analyseur et pour obtenir de nouveau l'extinction il faut faire tourner l'un des prismes d'un angle déterminé.

La traversée du quartz a eu pour effet de faire tourner d'un certain angle le plan de polarisation.

(*b*) — *Loi de Biot.* — *Biot* a trouvé que l'angle ω dont il faut faire tourner l'analyseur pour réaliser l'extinction d'un rayon de lumière monochromatique, c'est-à-dire l'angle dont doit tourner le plan de polarisation, *est proportionnel à l'épaisseur* e *de la lame de quartz* ($\frac{\omega}{e}$ étant appelé *le pouvoir rotatoire du quartz*), *varie selon les couleurs et est inversement proportionnel au carré de la longueur d'onde* λ.

Nous devons à la vérité d'ajouter qu'il n'est pas tout à fait exact que l'angle ω soit inversement proportionnel à λ^2. Les expériences de M. *Broch* et de M. *Wiedemann*, exécutées avec une précision extrême, s'accordent pour montrer que sur ce dernier point la loi de *Biot* ne doit être considérée que comme très approchée.

(*c*) — *Cas d'une lumière composée.* — Considérons un faisceau polarisé; à sa sortie de la lame de quartz, ce faisceau est composé d'autant de faisceaux polarisés dans des azimuths différents que le faisceau primitif contenait de rayons de lumière à longueurs d'onde différentes.

On ne peut donc éteindre à la fois tous les rayons, mais l'analyseur affaiblit inégalement ceux-ci et *produit une teinte.*

B — *Description de la lunette polarimétrique.* — La lunette comprend comme organes principaux :

Un analyseur,
Un polariseur,
Une lame de quartz.

Les figures ci-dessous et la légende qui les accompagne permettent de se rendre un compte exact de la construction de l'appareil.

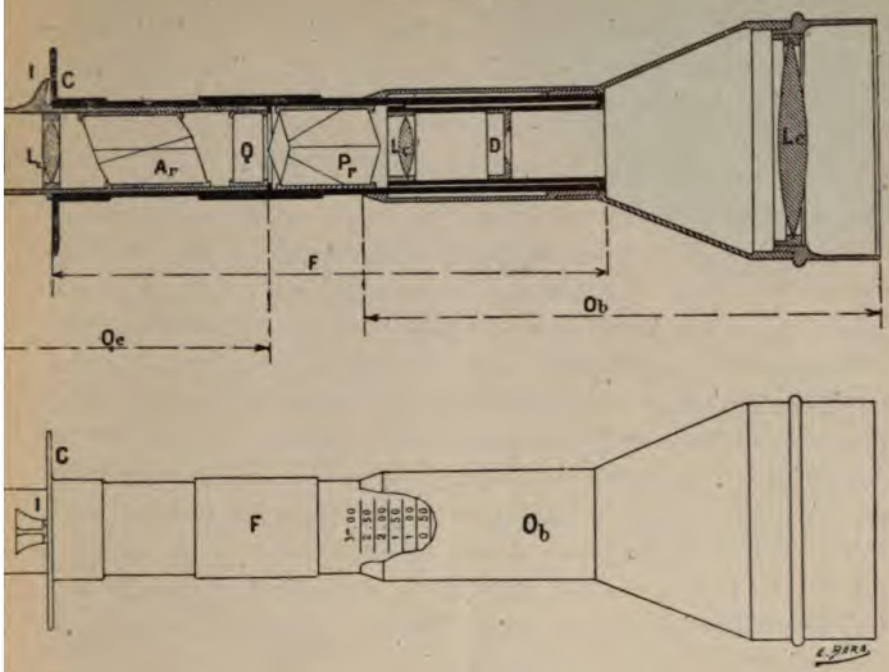


Fig. 1 et 2. — Lunette polarimétrique de MM. Mesuré et Nouel pour l'évaluation des températures des corps incandescents.

I, index. — *C*, disque divisé en degrés. — *Lc*, lentilles convergentes. — *Ar*, analyseur Nicol. — *Ob*, objectif avançant ou reculant le long de la partie fixe. — *Pr*, polariseur Nicol. — *Q*, lame de quartz. — *D*, diaphragme. — *Oc*, oculaire pouvant tourner autour de l'axe de l'appareil. — *F*, partie fixe de l'appareil,

Fig. 3.
Vue du disque et de l'index.

C — *Théorie de l'appareil.* — Si l'on examine au spectroscope un corps incandescent, on obtient un spectre continu plus ou moins développé suivant que la température est plus ou moins élevée.

En deçà du rouge sombre, le spectre est à peine visible et se réduit à une étroite bande rouge; au delà, les rayons orangé, jaune, vert et bleu viennent s'ajouter aux rayons rouges. Or, si l'on désigne par ω_λ l'angle de rotation du plan de polarisation d'un rayon de longueur d'onde λ reçu dans la lunette et par α l'angle de la section principale de l'analyseur avec le plan primitif de polarisation, l'intensité de la lumière de ce rayon a, comme on sait, pour expression : $\sin^2(\omega_\lambda - \alpha)$.

La valeur de ω, variant d'une manière continue avec la longueur d'onde, il s'ensuit qu'une variation continue de l'angle α donnera une modification continue du degré d'intensité du rayon sortant de l'analyseur.

« *Pour un corps incandescent, les proportions des divers rayons simples variant avec la température, il s'ensuivra que pour une rotation donnée de l'analyseur la teinte composée obtenue sera différente suivant cette température et que le passage d'une teinte à une autre se fera pour une rotation assez faible de l'analyseur.*

Si l'on se sert de l'appareil pour apprécier les températures métallurgiques, on trouve, en particulier, que le passage du vert au rouge se produit pour une rotation assez faible de l'analyseur.

La teinte perçue passe, dans ce cas, par une nuance *citron sale* qui est prise comme *teinte de passage* et la rotation correspondante de l'analyseur définit la nuance lumineuse observée.

L'amplitude de la rotation et la netteté de la teinte de passage sont fonction de l'épaisseur de la lame de quartz : on adopte généralement une épaisseur de 10 à 12 millimètres.

Le tableau suivant donne quelques températures d'un lingot d'acier pour des angles de rotation de l'analyseur correspondant à la teinte citron sale.

ANGLES DE ROTATION CORRESPONDANT A LA TEINTE CITRON SALE	TEMPÉRATURES DU LINGOT
40°	900°
46	1000
52	1100
57	1200
62	1300
66	1400
69	1500

La lunette pyrométrique est un appareil de dimensions restreintes, très léger, très maniable et qui peut être mis entre les mains d'un contre-maître.

Cependant son emploi est limité : si un lingot est au four de réchauffage, par exemple, la lumière émise par les parois ou les flammes pé-

nètre dans l'objectif aussi bien que celle donnée par le lingot et fausse le résultat.

Deux lingots à la même température et recevant de l'extérieur un éclairage différent donnent des angles différents pour la teinte de passage.

De plus, tous les opérateurs n'ayant pas la même vue, il y a lieu de corriger l'échelle établie par un coefficient personnel.

2°) Pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier.

L'emploi des couples thermo-électriques pour la mesure des températures élevées a été proposé, dès 1836, par *Becquerel* et *Pouillet*. Ce procédé en discrédit jusqu'à ces dernières années a été remis en honneur à la suite des travaux de M. *H. Le Chatelier* qui attribua les mauvais résultats obtenus antérieurement à l'emploi du fer et du palladium pour constituer le couple thermo-électrique. Ces métaux seraient en effet ceux qui conviendraient le moins pour un semblable usage.

A. — *Description de l'appareil employé.* — Il existe deux modèles de cet instrument, tous deux conçus d'après le même principe. Nous ne décrirons que le second plus susceptible d'un emploi industriel.

L'appareil est constitué par une pile thermo-électrique dans laquelle le couple est formé de deux fils soudés ou simplement en contact, l'un de platine rhodié (à 10 0/0 de rhodium), l'autre de platine pur fondu ; le platine soudé n'étant pas assez homogène. Deux conducteurs partent de ces fils et forment un circuit fermé qui passe sur la bobine C d'un galvanomètre apériodique à miroir *Deprez et d'Arsonval*.

Si l'on chauffe le couple, un courant se produit et imprime au cadre C constituant la bobine une déviation mesurée sur la règle graduée E par le déplacement de l'image *i* du réticule R réfléchie par le petit miroir *m*. Ce réticule est éclairé par une lampe L.

Les forces électromotrices sont ainsi mesurées à l'aide d'indications très rapides. Un galvanomètre, d'une résistance intérieure de 250 ohms, donne sur l'échelle transparente placée à un mètre une déviation de 100 millimètres par $\frac{1}{100}$ de volt avec interposition d'une résistance convenable et de $128^{mm},6$ sans résistance interposée. Les forces électromotrices sont proportionnelles, à $\frac{1}{100}$ près, aux indications de l'échelle jusqu'à 150 millimètres au moins.

Le galvanomètre d'une part, la lampe et la réglette E d'autre part, sont fixés sur des panneaux en bois qu'on peut accrocher à un mur

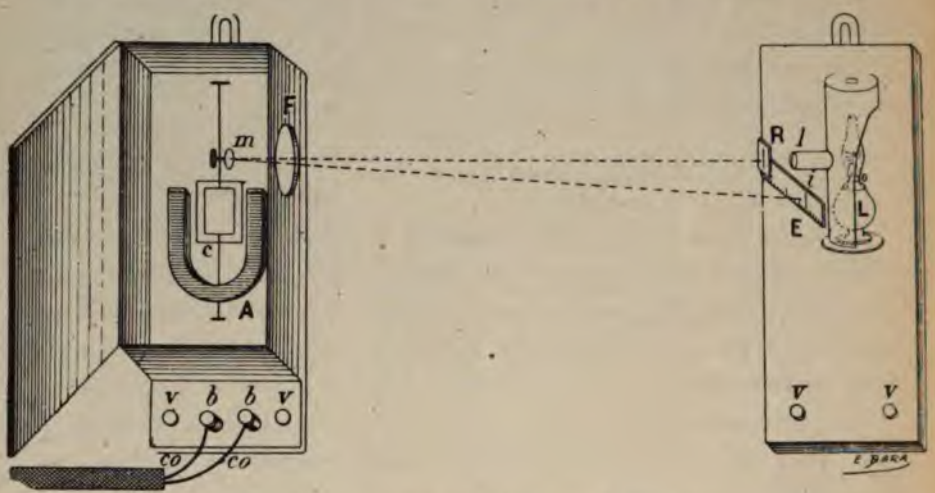


Fig. 4. — Pyromètre thermo-électrique « Le Chatelier ».

A, aimant permanent. — *c*, cadre mobile fil maillechort. — *m*, miroir fixé au cadre. — *b*, bornes. — *co*, conducteurs. — *F*, fenêtre. — *L*, lampe à essence. — *l*, lentille. — *R*, réticule. — *E*, réglette graduée transparente. — *i*, image du réticule. — *V*, vis calantes.

dans le bureau du contre-maître et à une distance quelconque de la source de chaleur.

Le couple est placé au contact de cette source, le courant se produit aussitôt et l'image *i* vient couvrir sur la règle une division dont la distance à l'origine permet d'évaluer la température.

B. — *Points fixes de la graduation.* — La graduation de l'échelle est faite empiriquement, mais après la détermination d'un certain nombre de points fixes *au moyen du thermomètre à air :* celui-ci peut être employé soit directement en le plaçant à côté du couple, soit indirectement en se servant des points de fusion ou d'ébullition antérieurement déterminés.

C'est la seconde méthode qu'a préférée M. H. *Le Chatelier*, elle est de beaucoup la plus rapide et en même temps la plus exacte, puisqu'elle permet d'utiliser les mesures des températures effectuées par les opérateurs les plus habiles. Voici les points fixes utilisés : ils sont, pour

les températures élevées, empruntés exclusivement aux déterminations de M. *Violle*.

TEMPÉRATURE	FUSION	ÉBULLITION
100°	—	H^2O
325	Pb	—
358	—	Hg
415	Zn	—
448	—	S
665	—	Se
945	Ag	—
1045	Au	—
1054	Cu	—
1500	Pd	—
1775	Pt	—

Ces divers points ne sont pas tous d'un usage aussi commode. Le point de fusion du zinc paraît présenter une anomalie semblable à celle que présente le soufre. En échauffant rapidement ce métal de façon à dépasser son point de fusion et le laissant ensuite se refroidir, on observe un intervalle de 15° entre le point de fusion et celui de solidification ; mais si, une fois solide, on le réchauffe immédiatement, la même anomalie ne se produit plus.

Le zinc, l'argent et le cuivre émettent, dès le point de fusion, des vapeurs altérant le platine des couples. Le soufre et surtout le sélénium en vapeurs altèrent très rapidement le palladium. Quant au platine ou à ses alliages, ils paraissent inaltérables dans les mêmes conditions.

C. — *Des métaux à adopter pour le couple.* — Pour étudier l'homogénéité des fils, M. H. *Le Chatelier* les chauffait après recuit, sur une longueur de 15^{mm}, à une température voisine de 700°. La source de chaleur était déplacée progressivement sous le fil tendu horizontalement et l'on notait les déviations produites ainsi sur le galvanomètre.

Le *palladium* donna des déviations importantes variant de sens d'un point à l'autre du fil. Les résultats étaient les mêmes soit avec les fils provenant du forgeage de la masse métallique, soit avec ceux préparés avec du métal fondu.

Les résultats obtenus avec *le fer* n'ont pas été meilleurs : tous les

échantillons des fils de fer essayés (*fer puddlé, Bessemer basique ou acier extra-doux*) ont manifesté des anomalies semblables à celles du palladium.

Les fils préparés avec du *platine pur* ou allié au *rhodium*, à *l'iridium* et au *cuivre* (*le métal ayant été obtenu par voie de fusion*) ont manifesté une homogénéité remarquable.

En général, le *mode de jonction des fils* ne semblait jouer aucun rôle dans les propriétés des couples.

D. — *Loi de variation de la force électromotrice avec la température.* — *Avenarius* et *Tait* ont montré que pour la plupart des couples étudiés par eux cette loi peut, entre 0° et 400°, être mise sous la forme :

$$E = A(\tau - \tau_0) + B(\tau^2 - \tau_0^2)$$

τ et τ_0 étant les températures absolues des deux soudures.

Cette formule permet de transformer en degrés les indications de l'échelle. Lorsque la soudure froide est maintenue dans la glace fondante, cette expression de E devient :

$$E = at + bt^2$$

Les expériences de M. *Edm. Becquerel* sur le couple P_t-P_d qui ont été poussées jusqu'à 1400° sont assez exactement représentées par une formule analogue, sauf entre 300° et 500°, où elles présentent une perturbation singulière.

M. *Le Chatelier* a jugé intéressant de reprendre cette loi ; car, de son exactitude, dépendait la possibilité de graduer un couple en employant seulement deux points fixes, comme on le fait pour le thermomètre à mercure entre 0° et 200°.

La formule de *Tait* et d'*Avenarius* s'applique entre 0° et 1500° avec le degré d'approximation que comporte l'emploi d'un métal aussi hétérogène que le palladium, mais pour les autres couples il y a lieu de compléter la formule par un troisième terme en t^3 ou de diviser la courbe en deux parties dont chacune serait représentée par une formule distincte.

Pour le couple *platine-platine rhodié*, il faudrait employer une formule plus complexe encore pour représenter les résultats de l'expérience à 10° près, c'est-à-dire avec une précision inférieure même à celle que comportent les expériences. Mais si l'on trace la courbe

relative à ce couple, on s'aperçoit que, entre 500° et 1000°, elle présente un point d'inflexion dont la tangente se confond avec la courbe sur une grande étendue.

On peut, entre 300° et 1200°, intervalle de température où les mesures sont les plus intéressantes, identifier la courbe avec une droite dont l'équation serait :

$$E = -0,15 + 0,115\,t.$$

En résumé, le couple *platine pur fondu-platine rhodié fondu* à 10 0/0 permet d'obtenir la mesure des températures inférieures à 1200° avec une approximation d'environ 10°, c'est-à-dire supérieure à celle que peut donner le thermomètre à air lorsqu'il est employé d'une façon courante.

Pour obtenir cette précision, M. Le Chatelier recommande de faire la graduation du couple dans le cours même des expériences pour éviter l'influence des variations de température sur la résistance du cadre du galvanomètre et d'éloigner du couple, pour le préserver de toute altération ; les métaux volatils : plomb, zinc, cuivre, etc... et aussi, lorsque l'atmosphère est réductrice, les matières siliceuses telles que la terre réfractaire des creusets.

3° PYROMÈTRE OPTIQUE DE M. H. LE CHATELIER

La méthode du pyromètre optique a été magistralement exposée par M. H. *Le Chatelier* dans le *Journal de physique*. Cette étude nous a été fort utile pour donner sur ce remarquable appareil tous les renseignements nécessaires.

A. — *Coup d'œil rétrospectif sur les procédés optiques.* — Il nous paraît intéressant de rappeler les essais tentés dans cette voie avant d'entreprendre l'étude du nouvel appareil de M. H. *Le Chatelier*.

Les procédés optiques, quand ils sont bien compris, offrent de grands avantages : ils dispensent de l'emploi de corps thermométriques spéciaux dont aucun ne peut résister longtemps aux températures élevées des foyers métallurgiques. En outre, ils n'exigent pas entre le four et l'opérateur de connexion matérielle toujours difficile à établir dans une usine où les ouvriers et les engins mécaniques circulent en tous sens, parfois avec une grande rapidité.

Nous avons déjà apprécié la méthode optique rudimentaire des couleurs lumineuses de *Pouillet*.

Ed. Becquerel, en 1864, à la suite de ses recherches sur l'irradiation des corps incandescents, énonçait l'idée d'estimer les hautes températures par les mesures photométriques de l'intensité lumineuse des radiations rouges émises par les corps incandescents, et appliquait sans grand succès la méthode à la détermination du point de fusion du palladium et du platine, de la température du charbon de l'arc voltaïque, etc...

Plus tard M. *Violle* faisait faire un grand pas à la question en démontrant l'inexactitude de la loi de *Dulong* que les expériences d'*Edmond Becquerel* semblaient confirmer.

Malgré les efforts de M. *Crova* qui, en 1879, à l'aide d'appareils compliqués et pourtant peu précis, cherche à déterminer les températures élevées par les mesures de la variation relative de l'intensité de radiations différentes (rouge et verte), il ne semble pas qu'une méthode optique ait quelque motif de prévaloir.

Il faut arriver en 1887 à la lunette pyrométrique de MM. *Mesuré* et *Nouel* qui, en interceptant les radiations de réfrangibilité moyenne, exagère la variation de nuance des corps incandescents, pour réaliser un appareil susceptible d'être employé dans l'industrie.

M. H. *Le Chatelier* par son pyromètre optique « *complète l'œil par* « *l'adjonction d'un appareil de mesure qui est très précis, tout en* « *restant suffisamment simple, et ne demandant pas, pour son emploi,* « *un apprentissage longtemps prolongé.* »

B. — *Des difficultés d'emploi des appareils basés sur la mesure des variations de nuance.* — La mesure des variations de nuance, c'est-à-dire des variations inégales d'intensité de radiations différentes présente de grandes difficultés, car le phénomène mesuré éprouve des changements trop peu supérieurs aux erreurs d'observation.

D'après M. *Violle*, le rapport des intensités des radiations $\lambda = 656$ (rouge) et $\lambda = 482$ (bleu) varie dans le rapport de 1 à 4,5 pour un intervalle de température de 700°. Or, l'incertitude sur les mesures de ce rapport ne peut pas être pratiquement inférieure à 10 0/0, ce qui entraînerait déjà une erreur de 50° de ce fait, indépendamment de celles dues à d'autres causes.

La variation absolue d'intensité des radiations de longueur d'onde

déterminée, des radiations rouges par exemple, atteint au contraire pour le même intervalle de température de 700° entre 1000° et 1700° le rapport de 1 à 300. Elle s'élève entre 600° et 1800° de 1 à 1000000.

Des considérations précédentes ressort donc la sensibilité d'une méthode basée sur la mesure absolue des variations.

C. — Exposé de la méthode optique de M. H. Le Chatelier. — L'appareil choisi est le photomètre de M. *Cornu* disposé de manière à ne laisser passer que des rayons rouges, et cela, parce que les seuls verres monochromatiques sont de cette nuance. Les radiations rouges ont, d'autre part, l'avantage d'être les premières qui se développent dans les corps incandescents ; leur emploi permet donc de faire porter les mesures sur le plus grand intervalle possible de température.

(*a*). — *Description et fonctionnement général du photomètre.* — La forme extérieure du photomètre *Cornu* a été modifiée afin de pouvoir adapter cet instrument aux besoins des usines.

Le champ de la lunette est divisé par un miroir en deux parties

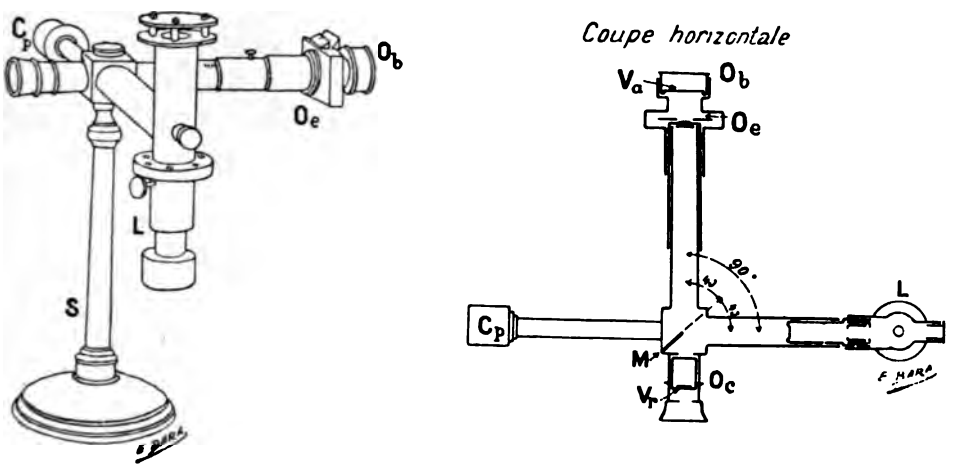


Fig. 5 et 6. — Photomètre pyrométrique « Le Chatelier » pour la mesure des hautes températures.

Cp, contrepoids. — *Oc*, oculaire. — *Ob*, objectif. — *L*, lampe à essence. — *Oe*, œil de chat (diaphragme extensible). — *M*, miroir. — *Vr*, verre rouge. — *Va*, verres foncés absorbants. — *S*, Support de l'appareil.

égales de façon à recevoir à la fois les rayons directs venant de la

source et les rayons réfléchis venant d'une lampe considérée comme étalon de lumière.

Le microscope qui, dans l'appareil de M. *Cornu*, sert à viser les images du corps incandescent et de la source de lumière a été remplacé par un simple oculaire.

Un verre rouge est placé devant l'oculaire qui reçoit sur une de ses moitiés la lumière venant de la source examinée, foyer de réchauffage, foyer d'élaboration ou lingot, et sur l'autre moitié la lumière d'une petite lampe à essence réfléchie par le miroir.

En avant du diaphragme en œil de chat précédant l'objectif peuvent être placés des verres absorbants foncés qui doivent avoir été choisis de manière à ne pas altérer la nuance des radiations rouges transmises. Il importe, à cet effet, que les oxydes colorants de ces verres soient constitués par un mélange d'oxyde de fer et d'oxyde de cuivre avec un peu d'oxyde de manganèse et de nickel.

L'ouverture variable du diaphragme en œil de chat laisse pénétrer une quantité plus ou moins grande de lumière émise par la source. Le mouvement de ce diaphragme est commandé par une molette graduée qui tourne devant un index.

En agissant sur le diaphragme on amène à être égales l'intensité de la teinte fournie par la source dont on veut déterminer la température et celle de la teinte fournie par la lampe.

La division de la molette qui se trouve à ce moment en regard de l'index indique la température de la source. La graduation a été établie pour arriver à ce but ; on en dira quelques mots plus loin.

(*b*) — *Détails sur la manière d'opérer.* — Régler tout d'abord le miroir au moyen de trois vis calantes de façon que le faisceau lumineux provenant de la lampe et réfléchi par le miroir et celui venant directement de l'objet visé pénètrent intégralement dans l'œil. Cette dernière condition est remplie si les images données par l'oculaire des deux objectifs se superposent entre elles et sont situées sur l'axe de la lunette. On le vérifie en visant avec une loupe ces deux images qui se forment un peu en arrière de l'anneau oculaire. La lampe de comparaison du photomètre doit, pour donner des indications constantes, avoir une hauteur de flamme régulière, son image devant être exactement coupée en deux par l'arête du miroir, résultat que l'on obtient en faisant tourner la lampe dans sa monture où elle est excentrée.

Enfin, avant de faire une mesure, attendre que la lampe ait pris son

échauffement normal ; alors seulement la flamme présente un éclat constant.

Pour faire une mesure : viser avec la lunette l'objet lumineux de façon que son image soit coupée par l'arête du miroir et soit ainsi amenée en contact avec l'image de la flamme, faire varier l'ouverture du diaphragme en œil de chat jusqu'à ce que l'égalité d'intensité des deux images soit obtenue.

Soit n le nombre de divisions donnant à ce moment l'ouverture de l'œil de chat ; soit n' le nombre correspondant en visant la flamme de la lampe étalon, on aura pour l'intensité mesurée :

$$I = \left(\frac{n'}{n}\right)^2$$

Si, ce qui est le cas général, les objets visés sont à des distances différentes, on aura en appelant f et f' les distances focales des images de l'objet et de la lampe-étalon :

$$I = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{f}{f'}\right)^2$$

Si K est le coefficient d'absorption des verres absorbants, on sait qu'on pourra le déterminer après avoir visé un objet d'intensité convenable. Il faudra pour cela mesurer l'ouverture N de l'œil de chat sans les verres absorbants, puis l'ouverture N' après leur interposition. On aura :

$$K = \left(\frac{N}{N'}\right)^2$$

Dans une mesure faite avec p verres absorbants on aura :

$$I = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{f}{f'}\right)^2 \left(\frac{1}{K}\right)^p$$

S'il s'agit, au contraire, d'un objet peu lumineux, il faudra placer les verres absorbants devant la lampe, la formule donnant I s'établissant sans difficulté (1).

c) Graduation. — Avant de chercher à établir la graduation, c'est-à-dire « *la relation qui existe entre l'intensité de la radiation des corps incandescents et leur température* », il est indispensable d'étudier leurs pouvoirs émissifs.

---

(1) $I = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{f}{f'}\right)^2 K^p$

« *Le pouvoir émissif est le rapport de l'intensité des radiations émises* « *par un corps incandescent dans une enceinte froide à celle des ra-* « *diations émises par le même corps placé au milieu d'une enceinte de* « *même température et aperçu par une ouverture infiniment petite* « *pratiquée dans cette enceinte.* »

Pour mesurer les pouvoirs émissifs, M. H. *Le Chatelier* a utilisé la remarque suivante de *Kirchhoff*, à savoir « *que l'intérieur des fissures d'un corps peut être considéré comme renfermé dans une enveloppe de température uniforme sous la réserve, bien entendu, que l'ouverture des fissures soit assez petite.* »

Si cette remarque est juste, on aura résolu le problème difficile consistant dans la réalisation d'enceintes de même température que les corps chauffés et alors « *le pouvoir émissif d'un corps sera, à la température considérée, égal au rapport de l'intensité lumineuse de la surface à celle du fond des fissures.* »

Pour faire ces mesures de pouvoir émissif, M. H. *Le Chatelier* a employé des petites sphères ou des petits cylindres de 5 mm. de diamètre perforés, suivant un diamètre, d'un trou de 1 mm. de diamètre et de 4 mm. de profondeur.

Les résultats suivants ont été obtenus pour les radiations rouges au voisinage de 1300°.

CORPS	POUVOIRS ÉMISSIFS
Sesquioxyde de fer et carbone (Fe^3O^4 et C)	1
Palladium	0, 6
Platine (mat.)	0, 4
Platine poli et argile blanche .	0,25
Magnésie	0, 1

Ces nombres montrent que l'on peut pour le fer rouge, toujours oxydé à sa surface, considérer le pouvoir émissif comme égal à l'unité.

L'intensité des radiations est par suite indépendante de la température de l'enceinte et de l'éclat de la surface, propriétés précieuses pour les mesures optiques de température.

Pour graduer le pyromètre optique, M. H. Le *Chatelier* s'est servi de

ses couples thermo-électriques dont la soudure était recouverte de différents corps tels que le *palladium*, le *platine*, Fe^3O^4, etc.....

Une première série d'expériences faites dans un tube chauffé extérieurement aussi régulièrement que possible a donné les résultats consignés ci-dessous :

INTENSITÉS	TEMPÉRATURES
0,0076	840°
0,029	920
0,064	960
2,6	1350

La difficulté d'obtenir une régularité suffisante de la température de l'enceinte n'a pas permis jusqu'ici de faire d'une façon complète cette série de mesures qui eût été évidemment la plus intéressante.

Une seconde série d'expériences a été faite en fondant sur la soudure du couple une petite quantité de sesquioxyde de fer (Fe^3O^4) et en la chauffant, pour les mesures, dans la flamme transparente d'un chalumeau à air ou à oxygène. Les résultats ne diffèrent pas sensiblement des précédents.

Une troisième série d'expériences a été faite avec le platine mat, en fondant un globule de ce métal sur la soudure du couple, le martelant pour obtenir une surface plane, recouvrant cette surface de platine pulvérulent provenant de la décomposition du chlorure et chauffant ce platine à 1500° pour l'amener à un état d'agrégation stable.

Résultats obtenus par les méthodes optique et thermo-électrique
(*pour mémoire*).

SOURCES DE CHALEUR			TEMPÉRATURES
1° Points de fusion.	Fonte blanche de Suède		1135°
	Fonte grise de moulage		1220
	Acier	doux à 0,1 0/0 de C.	1475
		mi-dur à 0,3 0/0 de C.	1455
		dur à 0,9 0/0 de C.	1410
	Acier manganèse à 13 0/0 de Mn . . .		1260
	Acier nickel à 25 0/0 de Nickel. . . .		1230
2° *Haut-fourneau* marchant en fonte grise p *Bessemer*.	Ouvrage en face de la tuyère		1930
	Coulée de la fonte	commencement . .	1400
		fin	1570
3° Four à *puddler* rotatif.	Coulée de la fonte	dans la poche. . .	1340
		dans le four . . .	1230
	Loupe en fin d'opération		1330
4° Four *Martin Siemens* (Acier mi-dur).	*a*) Gaz des gazogènes.	Sortie des gazogènes.	720
		Récupérateur à l'entrée .	400
		Récupérateur à la sortie.	1200
	b) Récupérateur.	Air sortant du récupérateur . . .	1000
		Fumées allant à la cheminée . . .	300
	c) Four.	Fin de la fusion de la fonte. . . .	1420
		Affinage de l'acier .	1500
	d) Coulée de l'acier	dans la poche	commencement. 1580
			fin . . 1490
		dans la lingotière .	1520
5° Convertisseur *Bessemer* (6 tonnes).	*a*) Coulée de la scorie		1580
	b) Coulée de l'acier	*dans la poche* . .	1640
		dans la lingotière .	1580
6° Four *Siemens* à creusets pour acier.	Intervalle des creusets		1600
7° *Lampes* électriques à incandescence	Non poussées		1800
	Surmenées		2100

TITRE Ier

TRAVAIL DE LA FONTE

LE MOULAGE

Préliminaires

La fonte peut être soumise :

1° *A un travail d'affinage.* — C'est là l'objet des méthodes d'élaboration des fers et des aciers ; cette étude a été faite dans la première partie du présent Traité (Élaboration des métaux) et en constitue véritablement le fond essentiel ;

2° *A un travail de moulage.* — C'est le moyen à employer pour fabriquer directement des objets en fonte ; on les obtient ainsi presque entièrement façonnés de par la coulée même du métal dans des récipients spéciaux appelés *moules.*

Ce procédé de fabrication des objets métalliques est, du reste, celui qui se présente le plus naturellement à l'esprit puisqu'on les obtient du premier coup, à quelques travaux d'usinage près pratiqués en fin de travail, par une opération métallurgique de coulée d'ordinaire fort simple et sans grand déchet de matière.

Il faut, toutefois, supposer que le prix de revient de la confection du moule n'est pas trop élevé.

Nous avons eu antérieurement l'occasion de dire qu'on ne procédait *généralement* pas ainsi pour les aciers et qu'on coulait *le plus souvent* ces métaux dans des récipients métalliques donnant après refroidissement des blocs plus ou moins compacts appelés *lingots*, de profils et de sections ordinairement fort simples mais très éloignés des formes définitives que doit avoir l'objet en fin de fabrication.

C'est par des modifications successives de forme déterminées par un travail à chaud qu'on amène le lingot à l'état d'objet brut de forge qu'un usinage ultérieur à froid transformera, après un plus ou moins grand nombre de traitements métallurgiques spéciaux, en objet fini.

L'étude du lingot, fort complexe du reste, fera l'objet de nombreux développements à propos du « *Travail de l'acier* ».

On fabrique bien, il est vrai, des moulages d'acier (et nous les avons déjà signalés dans notre première partie) ; mais, en étudiant le détail de leur fabrication, nous serons obligé de reconnaître que, malgré les efforts tentés dans cette voie, ces moulages ne sauraient remplacer les aciers dérivés des lingots par voie de transformation mécanique à chaud, du moins quand ces aciers doivent résister à de grands efforts dynamiques.

Les opérations à chaud : *forgeage, laminage*, etc... n'ont pas pour unique but de modifier la forme des lingots, *elles améliorent* notablement les qualités de résistance des fers ou des aciers.

Quant à la fonte, on ne saurait songer à la soumettre à un travail de transformation mécanique à chaud ; elle ne le supporterait pas à cause de sa très faible malléabilité.

Le moulage s'imposera donc pour la fabrication des objets en fonte puisqu'il n'est pas possible de modifier après coup la forme de ces objets.

Nous ne reviendrons pas sur les qualités qu'on devra rechercher pour les fontes destinées à être moulées, nous renvoyons à ce sujet à l'étude de la « *Classification des fontes* ».

CHAPITRE PREMIER

APPAREILS DES FONDERIES

Article 1er. — Fonderies de première fusion

Nous examinerons d'abord la marche en première fusion pour *moulages*, puis la marche en première fusion pour *saumons* ou *gueusets*.

A. — *Marche en première fusion pour moulages.* — Les fonderies de première fusion, sont, comme on sait, celles qui prennent directement la fonte au haut-fourneau pour la verser encore liquide dans les moules. C'est le procédé le plus économique, mais le moins sûr. Malgré toute l'habileté dont peut faire preuve un Ingénieur de haut-fourneau, l'allure de cet appareil ne sera jamais absolument régulière, la composi-

tion moyenne de la fonte variera d'une coulée à l'autre, elle variera encore du commencement à la fin d'une coulée par suite des liquations qui se produisent dans le creuset.

En outre, il est rare que les fabrications en cours s'accommodent toutes de la même qualité de métal ; il faut, pour donner satisfaction aux exigences du consommateur, employer le plus souvent plusieurs variétés de fontes : généralement, il est nécessaire de faire des mélanges que l'on varie suivant la nature des objets à couler, le travail qui devra leur être appliqué, les résistances auxquelles ils seront soumis. C'est dans la possibilité d'opérer les mélanges qui possèdent à coup sûr toutes les qualités que l'on recherche, que consiste le principal avantage de la *seconde fusion*.

Le plus souvent on n'emploiera pas les fontes de première fusion pour les objets soignés ; mais pour les objets communs ou pour ceux dont l'exagération des dimensions ou les formes simples garantissent la résistance, on pourra y avoir recours. Nous citerons comme usages principaux : la poterie, les tuyaux, les grosses pièces sans ajustage et, en général, tous les objets à la réussite ou à la ténacité desquels on n'attache pas une haute importance.

Les fontes au bois et au coke sont toutes deux employées au moulage : la première est principalement coulée en première fusion, tandis que la dernière convient particulièrement à la deuxième fusion.

Quand on fabrique de grandes pièces, on peut utiliser la coulée entière d'un seul coup ; à cet effet on coule dans une rigole en sable pratiquée dans le sol de la halle. La fonte se rend directement aux moules en suivant la rigole légèrement en pente : il faut placer sur le trajet une plaque debout formant *déversoir* pour que l'écoulement se fasse avec une vitesse régulière.

Il est rare cependant qu'on procède ainsi : le plus souvent on reçoit la fonte dans une poche de fonderie dont la description détaillée sera donnée à propos des appareils de fonderie en deuxième fusion. Ces poches, à paroi métallique revêtue intérieurement de terre réfractaire, sont portées par des wagonnets qui les conduisent de la halle du haut fourneau à celle de la moulerie : là, des grues les soulèvent pour aller successivement desservir les moules qui doivent être remplis avec la même nuance de fonte.

B. — *Marche en première fusion pour saumons ou gueusets.* — Si

l'on ne veut pas marcher en première fusion pour moulages, il faut refondre la fonte de première fusion coulée au haut-fourneau dans des appareils de deuxième fusion déjà sommairement décrits et dont il sera parlé d'une façon plus détaillée à l'étude des fonderies de deuxième fusion.

Il y a donc lieu d'indiquer ici comment se pratique une coulée au haut-fourneau, que la fonte soit destinée à l'affinage ou à une deuxième fusion en vue du moulage.

Quand tout est prêt pour la coulée, le fondeur et ses aides débouchent le trou du creuset en enfonçant à coups de masse une barre de fer dans le bourrage en argile. S'il s'est formé des garnissages intérieurs solides, il faut avoir recours à des burins d'acier qu'on bat au mouton.

La coulée de la fonte grise se fait en sable. Dans le sol de la halle formé d'un mélange de sable et de fraisil on pratique une série de bassins allongés communiquant par des déversoirs les uns avec les autres et avec une rigole qui vient du fourneau. Chacun d'eux recevra la quantité nécessaire de fonte pour former un *saumon*. Parfois on ne fait qu'une rigole partagée en plusieurs parties par de petits barrages à déversoirs : après le refroidissement on casse les jonctions minces et l'on débite ainsi la fonte en masses allongées appelées *gueuses* ou *gueusets*.

Comme le sable s'attache à la fonte on emploie souvent, pour avoir des produits plus propres, des lingotières en fonte à grande surface et de faible hauteur, à parois de 6 à 8 cm. d'épaisseur, enduites d'un lait de chaux ou d'argile pour empêcher l'adhérence. Par ce procédé on trempe un peu la surface et on modifie le grain ; aussi ne l'emploie-t-on pas pour les fontes destinées ultérieurement au moulage.

La fonte blanche qui est cassante se coule en dalles dans de grands bassins plats, puis on l'asperge d'eau pour la fendiller par la contraction.

Les trop gros fragments sont repris à leur tour pour être divisés à coups de masse.

Quant aux laitiers, ils sont coulés à part comme on sait : quand ils sont calcaires, on les utilise en agriculture ou dans la fabrication des ciments hydrauliques, etc.....

Article 2. — Fonderies de deuxième fusion

La fusion de la fonte peut se faire de trois manières : au *cubilot, au four à reverbère et au creuset.*

I. — *Les cubilots.*

A. — *But et organisation générale d'un cubilot.* — On appelle *cubilot* un fourneau du genre « *four à cuve* » construit en briques réfractaires et particulièrement réservé pour opérer la *fusion* des métaux ou de certains composés métalliques.

Cependant, on peut aussi opérer simultanément dans cet appareil *une épuration* si le revêtement intérieur est d'une nature spéciale et si le lit de fusion a été composé en conséquence. Nous citerons comme cubilot épurateur le cubilot inventé par M. *Rollet*, qui peut marcher, soit en fusion déphosphorante, soit en fusion désulfurante et dont nous avons donné la description et la théorie.

Il reste entendu que nous ne nous occuperons ici que des cubilots de simple fusion qui sont d'un usage beaucoup plus répandu.

La composition chimique de la fonte à produire étant fixée, on opère le mélange en proportions convenables de fontes de première fusion, classées à l'avance, à la suite d'analyses chimiques ou suivant l'aspect de la cassure s'il s'agit de fontes de provenances connues.

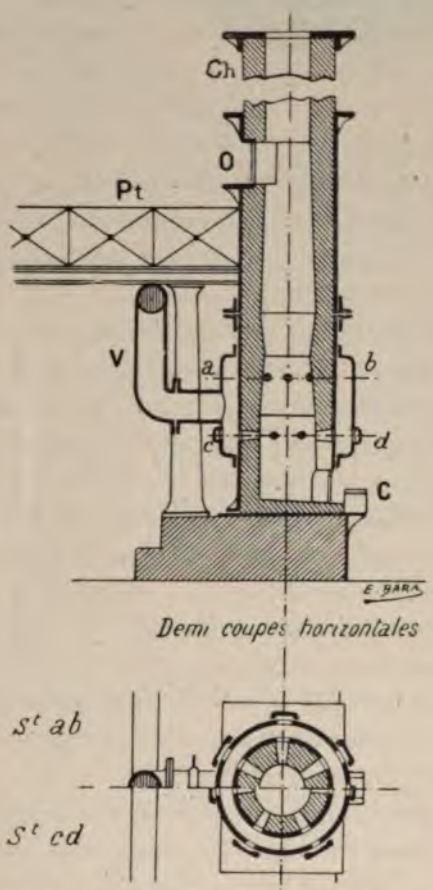


Fig. 7 et 8. — Cubilot.

Ch, cheminée. — *Pt*, plate-forme de chargement. — *O*, ouverture de chargement. — *V*, conduite de vent. — *ab*, premier plan de tuyères. — *cd*, deuxième plan de tuyères. — *C*, trou de coulée.

Le cubilot, sorte de four vertical à marche continue, est chargé par le gueulard de lits alternatifs de *fonte*, de *coke* et de *castine*.

Deux étages ou un seul étage de *tuyères*, selon le cas, amènent le vent généralement froid d'un ventilateur et la chaleur de combustion du coke détermine la fusion de la fonte qui coule goutte à goutte dans le creuset.

Lorsque ce creuset est suffisamment rempli pour les moulages qu'on a préparés, on débouche le trou de coulée qui était fermé par un tampon d'argile et l'on recueille la fonte dans une poche de fonderie.

La description des divers types de cubilots employés, la critique de leur organisation, etc... seront exposées plus loin.

B. — *Réactions caractéristiques qui s'effectuent dans le cubilot.* — On charge dans le cubilot du coke, des mélanges de fontes en gueusets de 15 à 20 kilos et quelquefois un peu de spath fluor pour augmenter la fluidité du laitier.

La castine fait passer au laitier les cendres du coke et combat partiellement la tendance qu'a la fonte à se sulfurer, car le coke en introduit toujours dans le lit de fusion.

a). — *Gaz dégagés au gueulard.* — Comme la proportion de combustible y est faible et que les charges consistant en gros morceaux offrent de larges passages aux gaz, une partie de CO^2 produit devant l'orifice des tuyères échappera à la décomposition que traduit la formule :

$$CO^2 + C = 2CO.$$

La combustion est donc plus complète dans ce genre de four que dans les fours à cuve de plus grandes dimensions : les gaz contiennent au gueulard au moins autant de CO^2 que de CO, aussi ne cherche-t-on guère à utiliser les gaz comme combustibles, ils s'échappent directement par une cheminée.

Dans les cubilots marchant au charbon de bois, il y a beaucoup plus de CO produit ; aussi la consommation y monte à 40 ou 50 0/0 du poids de la fonte tandis qu'elle n'est que de 10 à 12 0/0 dans les cubilots marchant au coke.

b). — *Quelle est l'action du cubilot sur la fonte qu'on y refond?* — Par sa faible hauteur et l'abondance du vent qui passe au travers de ses charges, le cubilot ne peut être considéré comme un appareil carburateur ou réducteur, quoique le *four à manche* dont il est une variété serve à la réduction des minerais.

Les fontes refondues au cubilot ont tendance à blanchir et cela parce qu'elles perdent du silicium et qu'elles absorbent du soufre.

Arrivé dans la zone des tuyères, le métal à l'état pâteux ne tarde pas à entrer en fusion et s'oxyde légèrement en passant sous le vent. Une proportion de 4 à 5 0/0 de fer peut brûler et se scorifier, soit aux dépens des cendres du coke, soit aux dépens de la silice produite par l'oxydation du silicium. Ce dernier corps brûle en proportions relativement plus fortes que le fer et sa teneur se réduit facilement d'une demi-unité pendant la fusion. Pour empêcher la fonte de blanchir il faudra forcer la proportion de coke.

Si l'on ajoute une certaine proportion de riblons de *fer* ou d'*acier* la nuance de la fonte devient de moins en moins grise, le silicium se dilue dans le métal, une plus grande quantité de carbone se combine et la fonte est *bonne pour la trempe*.

Si l'on essayait de fondre au cubilot des riblons de fer ou d'acier sans addition de fonte on y réussirait en forçant la quantité de coke, mais on obtiendrait de la fonte blanche peu carburée, peu fluide et impropre au moulage. En faisant au cubilot des mélanges à proportion convenable de fonte blanche et de fonte siliceuse ou *ferro-silicium*, on obtient de la fonte grise; nous ne reviendrons pas sur ce que nous savons à cet égard au sujet de la précipitation du graphite par le silicium.

Au lieu de fonte blanche ou peut aussi, pour obtenir de la fonte grise, faire fondre avec le ferro-silicium des riblons de fer et d'acier quand ils sont d'un prix peu élevé et qu'ils ne font pas défaut au four *Martin* ou dans la confection des paquets dont il sera question au travail du fer.

C. — *Organisation d'un cubilot et de ses accessoires*. — Le cubilot n'est pas autre chose qu'un haut-fourneau en miniature destiné non plus à réduire et à fondre, mais à refondre seulement.

Ses parois sont construites en *briques réfractaires* sur dix centimètres d'épaisseur environ, on les fait aussi en *pisé* pour rendre les réparations plus faciles; la sole du creuset est généralement en brasque siliceuse (coke pulvérisé, sable et petits cailloux).

La cuve était autrefois cerclée par des plaques de fonte, formant un prisme hexagonal ou octogonal; aujourd'hui on emploie surtout des revêtements cylindriques en tôle rivée.

a). — *Dimensions*. — La hauteur d'un cubilot est de 4 à 5 mètres

et son diamètre de 1 mètre à 1 m. 50 ; le profil intérieur était autrefois absolument cylindrique. Pour économiser le combustible on a été conduit à adopter en certains points des profils renflés ou étranglés.

En rétrécissant l'ouvrage, on y uniformise la température par une combustion plus complète ; en élargissant la cuve au-dessus de l'ouvrage

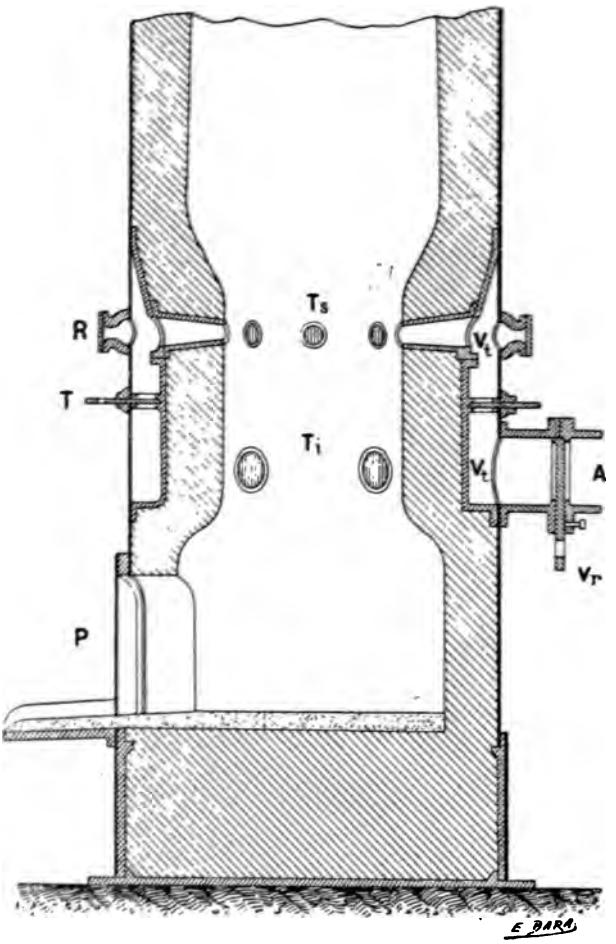


Fig. 9. — Cubilot de fonderie (coupe verticale de la région inférieure).

Vt, caisse à vent. — *Vr*, vanne de réglage du vent. — *A*, tuyau d'arrivée du vent. — *R*, regard en mica. — *P*, porte de défournement. — *T*, tiroir isolant les tuyères entre elles. — *Ts*, tuyères supérieures (8 sur la circonférence). — *Ti*, tuyères inférieures (4 sur la circonférence).

on permet aux gaz engendrés de mieux céder leur chaleur au lit de fusion.

Si, d'autre part, on élargit le creuset au-dessous de la région des tuyères, on pourra emmagasiner plus de fonte.

La section horizontale est généralement circulaire : il ne semble pas que les sections elliptiques ou rectangulaires à angles très arrondis adoptées par quelques fondeurs aient rendu la marche plus facile ou augmenté le rendement.

Un même trou de coulée peut servir dans les petits appareils à retirer d'abord la fonte puis les laitiers quand le creuset est vide. Dans la plupart des cubilots, il y a deux trous de coulée : l'un pour la fonte, l'autre situé au-dessus pour les laitiers. Souvent on fait usage pour le trou de coulée des laitiers de la tuyère *Luermann* dont nous avons donné la description à l'étude de la fonte.

b) — *De l'air nécessaire à la combustion.*— L'air froid arrive par les tuyères disposées autour de l'ouvrage ; souvent celui-ci est entouré d'une boîte ou caisse à vent.

Par cet arrangement, on opère à la fois le rafraichissement de la chemise réfractaire et le chauffage partiel du vent. La position des tuyères et leur nombre doivent être déterminés pour tranformer le plus complètement possible en acide carbonique l'oxyde de carbone dégagé dans la partie inférieure de l'appareil.

On rencontre souvent dans ce but deux rangées de quatre à cinq tuyères chacune espacées de 50 centimètres environ ; mais l'efficacité d'une pareille disposition n'est pas certaine et souvent dans les usines on ne se sert que d'une seule de ces rangées.

Le chauffage préalable de l'air insufflé est loin d'être aussi nécessaire que dans les hauts-fourneaux, à cause de la faible proportion de combustible employé. Il résulte d'expériences comparatives faites avec des cubilots semblables et semblablement chargés mais chauffés, l'un avec de l'air chaud, l'autre avec de l'air froid à même pression, que la différence dans la consommation du combustible est en faveur de l'air chaud ; mais la diminution n'est pas assez sensible (1 10e environ) pour que son emploi compense l'organisation plus compliquée qu'il serait nécessaire d'adopter pour la fonderie.

Il paraît démontré, en résumé, que l'emploi de l'air chaud détermine une augmentation dans la production et non une économie sensible. Il y aurait lieu toutefois de chauffer l'air dans le cas où l'on marcherait avec excès de combustible, ce qui est le cas du cubilot *Rollet*, comme on l'a vu.

Toute machine soufflante peut être utilisée pour le service des cubilots, même celle d'un haut-fourneau. Il suffira de brancher une conduite spéciale en dérivation. Cependant l'emploi des *ventilateurs* est beaucoup plus rationnel et s'est généralisé dans les fonderies de deuxième fusion.

La pression de l'air soufflé ne doit pas dépasser 2 à 3 centimètres de mercure. Dans ces conditions, avec les dimensions moyennes adoptées, on peut obtenir qu'un cubilot est susceptible de fondre trois à quatre tonnes de fonte par heure : le maximum étant de six à sept tonnes en exagérant ses dimensions.

D. *De quelques types de cubilots.* — Nous ne pouvons songer à décrire les divers modèles de cubilots : en donnant la description de quelques types spéciaux, nous indiquerons suffisamment dans quelle voie ont été dirigés les divers perfectionnements.

Les facilités d'entretien et de réparation, l'organisation du creuset et surtout les dispositifs de tirage, etc..... ont été l'objet des constantes recherches des ingénieurs de fonderie.

a). — Dans le cubilot du colonel **Maillard** (1), la cuve a été rendue indépendante des étalages pour faciliter les réparations : elle est portée à cet effet sur des colonnes avec écrous permettant de la relever au besoin.

b). — Des cubilots à *tirage naturel* furent construits il y a une quarantaine d'années et abandonnés assez rapidement : on dut bien vite revenir à l'emploi du *vent soufflé*. La chaleur perdue pour établir le tirage était considérable, le temps nécessaire à une fusion beaucoup trop long et la quantité d'air ainsi appelée trop faible pour faire fondre la fonte dans une zone assez grande.

En résumé, la production était insuffisante.

c). — Les cubilots du type *Ireland* sont ceux dans lesquels le vent soufflé arrive dans une boîte en tôle qui fait le tour de l'ouvrage, ainsi qu'on le voit dans le cubilot de fonderie du type ordinaire dont le croquis est figuré précédemment.

d). — Les cubilots à *tirage forcé* par *jet de vapeur* sont d'une installa-

(1) Le colonel d'artillerie de la marine Maillard mort en retraite à Nevers, il y a quelques années, après avoir été longtemps attaché à la fonderie de cette ville, a laissé le souvenir d'un métallurgiste éminent, d'un soldat de haut caractère et d'un homme dont la générosité envers tous est restée légendaire.

tion assez simple et font souvent concurrence aux cubilots à vent soufflé.

Nous citerons dans cette catégorie les types :

Woodward,
Krigar,
Herbertz.

1° *Cubilot Woodward.* — Ce cubilot est à revêtement extérieur métallique fixé au sol.

Dans la cheminée et dans l'axe de l'appareil est fixé l'*injecteur de vapeur* activant le tirage de l'air qui y pénètre par deux rangs de *prises d'air* situées dans la zone de fusion au-dessus du creuset.

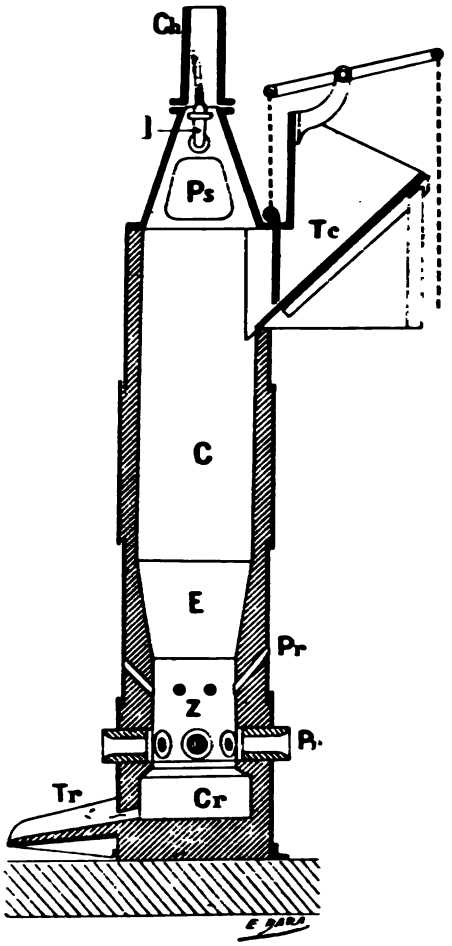


Fig 10. — Cubilot Woodward.

Ch, cheminée de tirage — *I*, injecteur de vapeur. — *Ps*, porte de service. — *Tr*, trémie de chargement. — *C*, cuve. — *E*, étalages. — *Pr*, prises d'air. — *Z*, zone de fusion. — *Cr*, creuset. — *Tr*, trou de coulée.

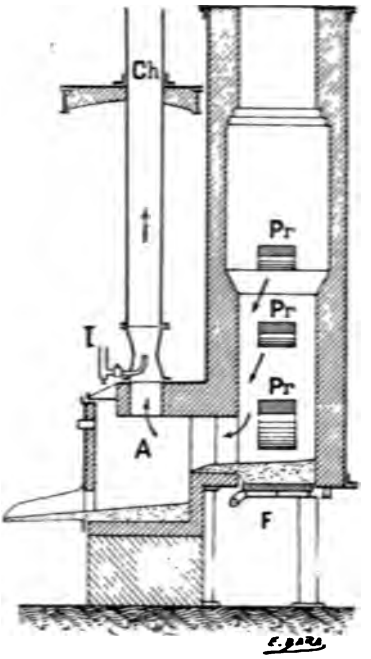


Fig. 11. — Cubilot système Krigar.

Ch, cheminée de tirage. — *I*, injecteur de vapeur. — *A*, avant-creuset. — *Pr*, Prises d'air munies à l'extérieur du cubilot de clapets régulateurs. — *F*, fond mobile.

[illegible] — [illegible] par une série de cheminées [illegible] métallique [illegible] à air à trois [illegible] différents [illegible] de notre [illegible].

[illegible] autour d'un axe horizontal [illegible] vers [illegible].

[illegible] que si les jours [illegible] que [illegible] communique [illegible] une cheminée en tôle de pour diamètre dont [illegible] est [illegible] un [illegible] de valeur.

[illegible] à air libre.

[illegible] sur la figure [illegible] se [illegible] effectue par [illegible] à petite cheminée métallique.

[illegible] se [illegible] ne [illegible] pas [illegible] diminues. [illegible] cependant [illegible] que [illegible] avant [illegible] utilisation [illegible] de combustible.

[illegible] — [illegible] métallique est porté par [illegible]. Le [illegible] de la cuve est [illegible] au moyen de [illegible] par des vis placées dans [illegible] par des [illegible] : il est susceptible [illegible]. En marche normale, on laisse [illegible] entre le creuset et le fond de la [illegible] par des [illegible] et par des ouvertures [illegible].

Le [illegible] du cubilot est celui des fours ordinaires soufflés: [illegible] est ménagée au-dessus de l'arrivée circulaire d'air et est située au corps de la cuve, d'un diamètre intérieur de 90 centimètres, par des étalages.

Le fond du creuset est formé par une porte de déchargement à axe horizontal qui sert à la visite de l'intérieur du four et à ses réparations.

Le *gueulard* est formé par le système *cup and cone* où les charges peuvent se sécher avant leur introduction dans le four. A cinquante centimètres environ au-dessous de l'appareil de fermeture se trouve latéralement l'appel de l'air formé de deux conduites cylindriques en tôle réunissant le cubilot à une cheminée voisine : dans l'axe de ces deux conduites concentriques est placé un injecteur de vapeur.

Le cubilot *Herbert* a un perfectionnement que n'a pas le cubilot *Woodward* et qu'on rencontre dans un grand nombre d'autres types :

l'air pénètre au premier étage par toute la périphérie du four. De plus la section annulaire de rentrée d'air est variable et réglable à volonté :

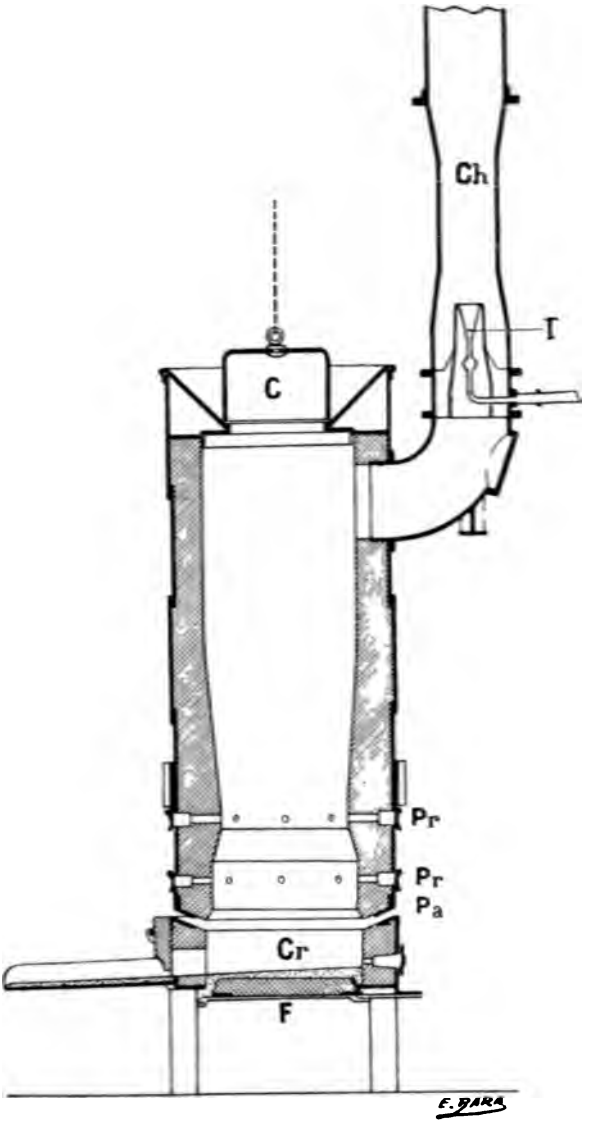


Fig. 12. — Cubilot système Herbertz.

Ch, cheminée de tirage. — *I*, injecteur de vapeur. — *C*, cup and cone. — *Pr*, prises d'air. — *Pa*, prise d'air annulaire et de hauteur variable. — *Cr*, creuset mobile verticalement. — *F*, fond mobile.

il a été dit plus haut que le creuset est susceptible d'un mouvement

vertical de translation. Il peut donc s'approcher ou s'éloigner du corps du cubilot diminuant ou augmentant d'autant la section d'admission d'air.

2° — Les cubilots à *tuyère centrale* sont, paraît-il, employés avec succès dans quelques usines américaines.

Le vent soufflé s'introduit dans l'appareil non seulement par des orifices pratiqués dans la porionnerie et débouchant dans la conduite annulaire qu'on rencontre dans les types ordinaires mais encore par une tuyère centrale en fonte revêtue de fer et protégée par un chapeau à peu de distance de son ouverture. Cette tuyère branchée sur une dérivation de la conduite de vent pénètre sur une assez grande longueur dans l'axe même du cubilot, solidement reliée à la plaque métallique constituant le fond du creuset.

E. — *Comparaison des cubilots à jet de vapeur et des cubilots à vent soufflé.* — L'emploi d'un jet de vapeur pour déterminer le tirage dans les fours à aspiration d'air supprime les pompes à air ou ventilateurs employés dans les fours à vent soufflé, mais n'est pas plus économique que ces pompes ou ventilateurs. Il résulte d'expériences faites à cet égard que le système par injection de vapeur serait légèrement plus onéreux; mais il présente en retour de nombreux avantages. Le système permet, en effet, l'extinction absolue des flammèches et des étincelles qui s'échappent ordinairement des gueulards, annulant ainsi toutes chances d'incendie puisqu'il supprime les poussières produites dans les fours soufflés, cause de réclamations continuelles dans le voisinage.

Il est presque impossible d'obtenir l'autorisation d'établir des cubilots soufflés dans les villes près des habitations, tandis que les cubilots à tirage forcé par la vapeur peuvent s'établir sans difficulté.

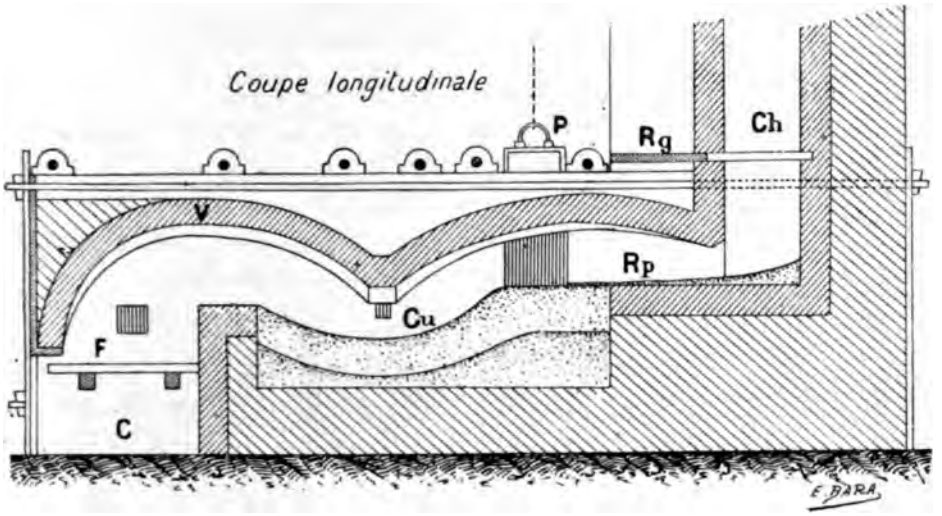
Les [illegible] par les soufflerie et, par conséquent, leur bruit insupportable sont supprimés. Le fonctionnement des cubilots à tirage ne nécessite que l'établissement de générateurs de vapeur et d'une tuyauterie simple, d'où diminution des premiers frais. Dans le cas de premier établissement en général et dans le cas d'établissement dans les villes, l'emploi de ces cubilots est tout indiqué [1].

[1] [illegible] un peu sommaire de ces importants appa[illegible] un travail fort complet de M. l'ingénieur Brunet sur [illegible]

Consulter également la Revue universelle des mines et de la métallurgie.

II. — *Des fours à réverbère.*

Les fours à réverbère sont des fours dans lesquels le combustible est entièrement séparé du métal et dont la surface supérieure présente une courbure calculée de manière à réfléchir le mieux possible les rayons



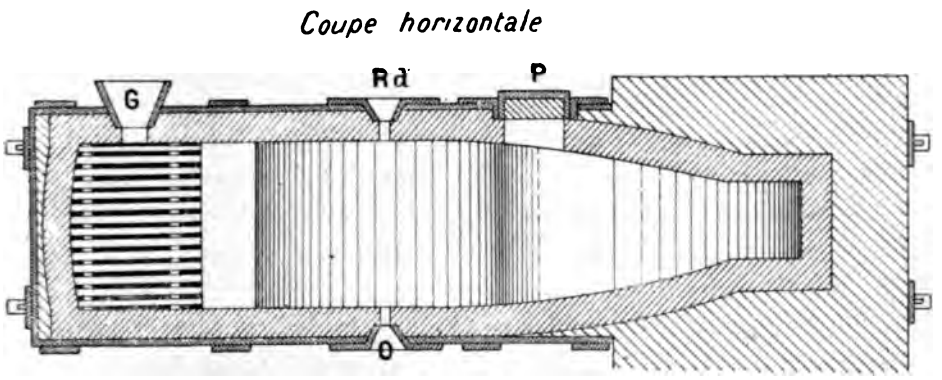


Fig. 13 et 14. Four à réverbère de fonderie.

F, foyer à grille. — *C*, cendrier. — *Cu*, cuve. — *Rg*, registre. — *Rp*, rampant. — *Ch*, cheminée. — *Rd*, regard. — *P*, porte de chargement — *O*, orifice de coulée. — *G*, gueulard. — *A*, armature en fonte. — *V*, voûte en maçonnerie réfractaire.

calorifiques de la flamme vers la sole et à y répartir uniformément la chaleur.

[illegible] donne une [illegible] sommaire à propos des [illegible] de moulage.

[illegible] — *[illegible]*. — [illegible] dans [illegible] au [illegible] [illegible] dans le [illegible] [illegible] la fonte. Il faut [illegible] [illegible] et [illegible] [illegible] de la [illegible]. On [illegible] la formation d'un [illegible], en [illegible] une certaine élimination du *manganèse* lorsque la fonte en contient.

La fonte au four à [illegible] [illegible] la fonte au moment [illegible] les [illegible] [illegible] mais elle est en [illegible] beaucoup plus [illegible] [illegible] moins bien utilisée qu'au moulé et l'atmosphère [illegible] [illegible] que un [illegible] plus fort par oxydation. La fonte [illegible] [illegible] des fontes ayant subi un commencement d'affinage [illegible] [illegible] et comme on [illegible] [illegible] qu'en une fois, on l'emploie de préférence pour [illegible] [illegible] le plus souvent de la qualité [illegible] [illegible] [illegible].

B. — *Les types de fours employés.* — On peut distinguer deux types de fours.

1° *Les fours* [illegible] [illegible] deux parties. L'une près de l'autre [illegible] [illegible] [illegible] une sorte de cuve ou de *bassin*, [illegible] [illegible] en pente plus ou moins forte [illegible] [illegible] [illegible].

On charge la fonte à l'extrémité près du rampant, et à mesure qu'elle fond elle se rend dans le bassin près du point où elle achève de s'échauffer pour prendre la fluidité nécessaire. Le chauffage est donc progressif et la chaleur [illegible] utilisée. Le bassin est recouvert, afin de concentrer la chaleur, d'une voûte spéciale rendant assez compliqués la construction du four et son entretien.

Si l'on n'a pas soin de bien conduire le travail, la fonte a grande tendance à s'oxyder, car elle reste très exposée à l'action du feu.

On emploie surtout ces appareils en *Angleterre* et ils sont parfois désignés dans nos usines, où ils sont aussi en usage, sous le nom de *fours anglais*.

2° *Les fours à sole plate* sont ceux que nous avons décrits à propos du puddlage dans notre première partie. Dans ces fours, le bain de fonte est peu épais et occupe toute l'étendue du laboratoire.

La sole a une légère pente (10 0 0) dirigée vers la porte de coulée qui est d'ordinaire sur le rampant, la voûte est assez haute (80 cm. à l'autel pour faciliter le chargement, la surface de la sole est de 2,5 à 3 fois celle de la chauffe. La longueur ne doit pas dépasser 3 mètres ; il faut la réduire si l'on n'a pas de bonnes houilles à longue flamme à sa disposition.

D'une manière générale, le cendrier doit être assez profond pour maintenir sous la grille une masse d'air froid capable d'activer le tirage.

La porte de chauffe doit être assez évasée vers l'extérieur pour per-

Coupe longitudinale.

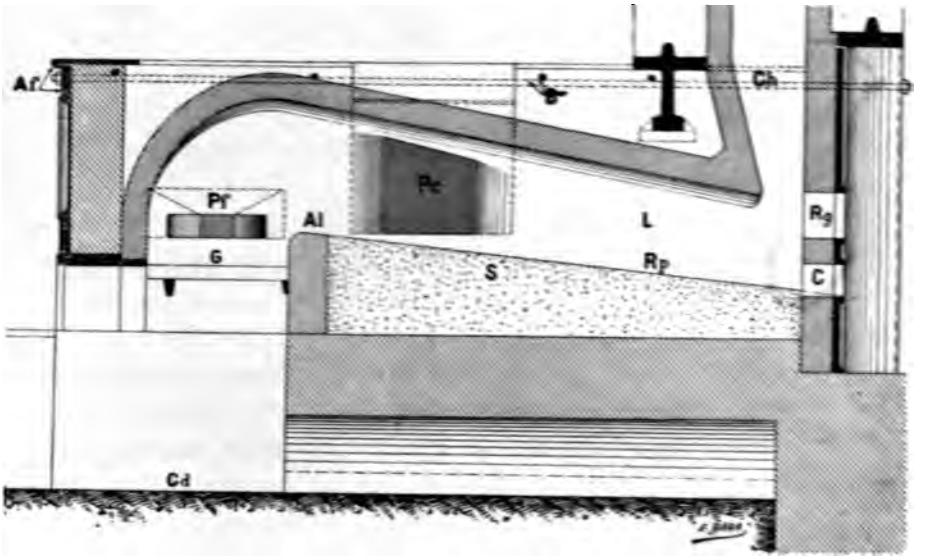


Fig. 15. — Four à reverbère à sole plate.

Af, armature en fonte. — *Pf*, porte de chauffe. — *G*, grille. — *Cd*, cendrier. — *Al*, autel. — *S*, sole en sable réfractaire battu en pisé. — *Rp*, rampe au dixième. — *L*, laboratoire. — *B*, boulons d'armature. — *Ch*, cheminée. — *Rg*, regard. — *C*, trou de coulée. — *Pc*, porte de chargement.

mettre au chauffeur de bien distribuer le combustible sur toute la grille. Sa hauteur au-dessus de la grille qui règle l'épaisseur du combustible est environ de 25 à 30 cm. Cette épaisseur doit être assez grande pour obtenir dans le four une atmosphère non réductrice en même temps qu'une haute température.

La hauteur de l'autel au-dessus de la grille doit être d'autant plus grande que le combustible est à flamme plus longue : on protégera ainsi bien mieux le métal contre l'action directe de la flamme.

2° *Cubilot Krigar.* — Ce cubilot est constitué par une sorte de cheminée réfractaire à enveloppe métallique percée de portes à air à trois niveaux différents dans sa moitié inférieure.

Un fond mobile autour d'un axe horizontal obture la cheminée vers le bas.

L'avant-creuset, situé un peu plus bas que le creuset, communique librement avec lui et avec une cheminée en tôle de petit diamètre dont le tirage est activé par un jet de vapeur.

Le gueulard est à air libre.

Les flèches indiquées sur la figure montrent le parcours effectué par l'air depuis les prises jusqu'à la petite cheminée métallique.

Les gaz chauds ne traversant pas les charges, la fonte ne s'oxyde pas à leur passage et les déchets se trouvent diminués. Il y a lieu cependant de signaler d'autre part que ces charges ne sont pas échauffées avant d'arriver à la zone de fusion et qu'il y a utilisation incomplète de combustible.

3° *Cubilot Herbertz.* — Ce cubilot à revêtement métallique est porté par quatre colonnes creuses. Le creuset indépendant de la cuve est soutenu au moyen de traverses formant écrous par des vis placées dans l'intérieur des colonnes et manœuvrées par des volants ; il est susceptible d'un mouvement vertical de translation. En marche normale, on laisse une distance libre d'environ 15 mm. entre le creuset et le fond de la cuve ; l'air pénètre par cette solution de continuité et par des ouvertures rondes situées au-dessus.

Le profil intérieur de ce cubilot est celui des fours ordinaires soufflés: une zone rétrécie est ménagée au-dessus de l'arrivée circulaire d'air et est reliée au corps de la cuve, d'un diamètre intérieur de 90 centimètres, par des *étalages*.

Le fond du creuset est formé par une porte de déchargement à axe horizontal qui sert à la visite de l'intérieur du four et à ses réparations.

Le *gueulard* est fermé par le système *cup and cone* où les charges peuvent se sécher avant leur introduction dans le four. A cinquante centimètres environ au-dessous de l'appareil de fermeture se trouve latéralement l'appel de l'air formé de deux conduites cylindriques en tôle réunissant le cubilot à une cheminée voisine : dans l'axe de ces deux conduites concentriques est placé un injecteur de vapeur.

Le cubilot *Herbertz* a un perfectionnement que n'a pas le cubilot *Woodward* et qu'on rencontre dans un grand nombre d'autres types:

l'air pénètre au premier étage par toute la périphérie du four. De plus la section annulaire de rentrée d'air est variable et réglable à volonté :

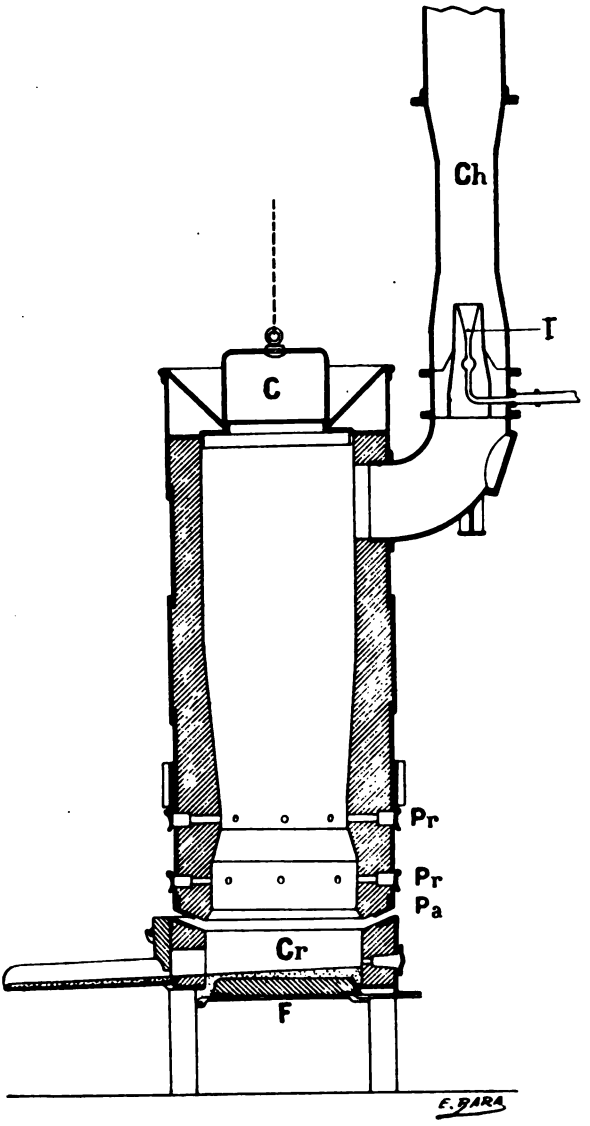


Fig. 12. — Cubilot système Herbertz.

Ch, cheminée de tirage. — *I*, injecteur de vapeur. — *C*, cup and cone. — *Pr*, prises d'air. — *Pa*, prise d'air annulaire et de hauteur variable. — *Cr*, creuset mobile verticalement. — *F*, fond mobile.

il a été dit plus haut que le creuset est susceptible d'un mouvement

vertical de translation, il peut donc s'approcher ou s'éloigner du corps du cubilot diminuant ou augmentant d'autant la section d'admission d'air.

e). — Les cubilots à *tuyère centrale* sont, paraît-il, employés avec succès dans quelques usines américaines.

Le vent soufflé s'introduit dans l'appareil non seulement par des orifices pratiqués dans la périphérie et débouchant dans la conduite annulaire qu'on rencontre dans les types ordinaires mais encore par une tuyère centrale en fonte cerclée de fer et protégée par un chapeau à peu de distance de son ouverture. Cette tuyère branchée sur une dérivation de la conduite de vent pénètre sur une assez grande longueur dans l'axe même du cubilot, solidement reliée à la plaque métallique constituant le fond du creuset.

E. — *Comparaison des cubilots à jet de vapeur et des cubilots à vent soufflé.* — L'emploi d'un jet de vapeur pour déterminer le tirage dans les fours à aspiration d'air supprime les pompes à air ou ventilateurs employés dans les fours à vent soufflé, mais n'est pas plus économique que ces pompes ou ventilateurs. Il résulte d'expériences faites à cet égard que le système par injection de vapeur serait légèrement plus onéreux ; mais il présente en retour de nombreux avantages. Ce système permet, en effet, l'extinction absolue des flammèches et des étincelles qui s'échappent ordinairement des gueulards, annulant ainsi toutes chances d'incendie puisqu'il supprime les poussières produites dans les fours soufflés, cause de réclamations continuelles dans le voisinage.

Il est presque impossible d'obtenir l'autorisation d'établir des cubilots soufflés dans les villes près des habitations, tandis que les cubilots à tirage forcé par la vapeur peuvent s'établir sans difficulté.

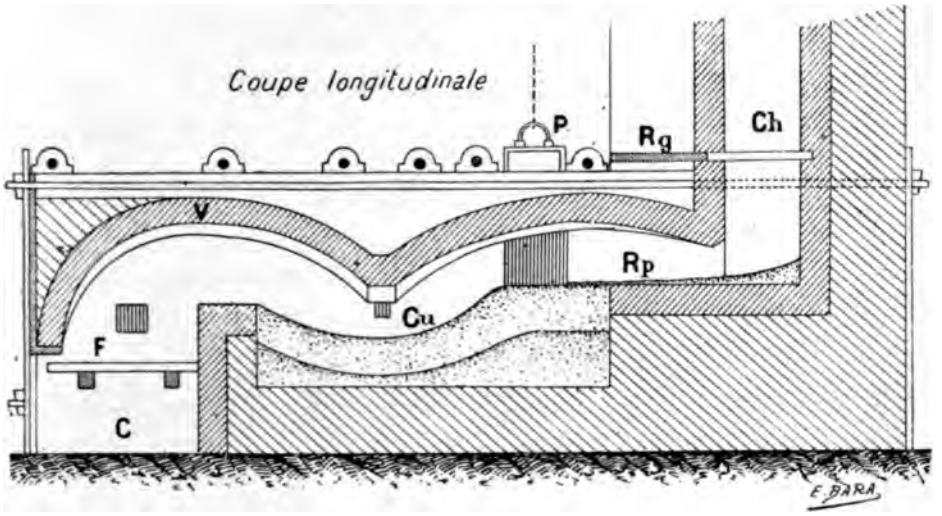
D'autre part les souffleries et, par conséquent, leur bruit insupportable sont supprimés. Le fonctionnement des cubilots à tirage ne nécessite que l'établissement de générateurs de vapeur et d'une tuyauterie simple, d'où diminution des premiers frais. Dans le cas de premier établissement en général et dans le cas d'établissement dans les villes, l'emploi de ces cubilots est tout indiqué (1).

(1) Pour compléter cette étude forcément un peu sommaire de ces importants appareils, nous renvoyons le lecteur à un travail fort complet de M. l'ingénieur Brunet sur les cubilots (Génie civil).

Consulter également la Revue universelle des mines et de la métallurgie.

II. — *Des fours à réverbère.*

Les fours à réverbère sont des fours dans lesquels le combustible est entièrement séparé du métal et dont la surface supérieure présente une courbure calculée de manière à réfléchir le mieux possible les rayons



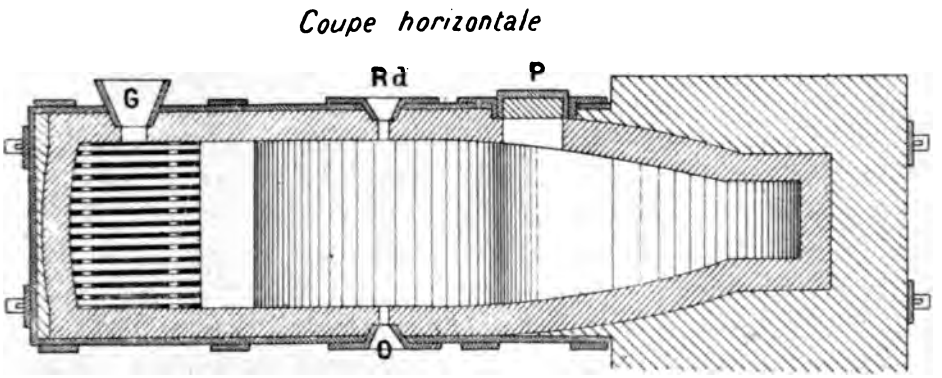


Fig. 13 et 14. Four à réverbère de fonderie.

F, foyer à grille. — *C*, cendrier. — *Cu*, cuve. — *Rg*, registre. — *Rp*, rampant. — *Ch*, cheminée. — *Rd*, regard. — *P*, porte de chargement — *O*, orifice de coulée. — *G*, gueulard. — *A*, armature en fonte. — *V*, voûte en maçonnerie réfractaire.

calorifiques de la flamme vers la sole et à y répartir uniformément la chaleur.

Nous en avons déjà donné une description sommaire à propos des appareils de puddlage.

A. — *Motifs de leur emploi.* — Quel que soit le soin apporté dans le choix du coke chargé au cubilot, le contact avec le combustible dénature toujours un peu la fonte. Il faut fondre les cendres du coke et ajouter à cet effet de la castine, d'où résulte la formation d'un laitier, entraînant forcément une certaine élimination du *manganèse* lorsque la fonte en contient.

La fusion au four à réverbère soustrait la fonte au contact nuisible des *cendres* et du *soufre* du coke mais elle est, en revanche, beaucoup plus coûteuse : la chaleur est moins bien utilisée qu'au cubilot et l'atmosphère toujours oxydante provoque un déchet plus fort par oxydation. Le four à réverbère fournit par suite des fontes ayant subi un commencement d'affinage qui leur donne plus de ténacité, et comme du reste il ne peut donner toute sa charge qu'en une fois, on l'emploie de préférence pour les grosses pièces qui exigent le plus souvent de la qualité : *canons*, *cylindres de laminoirs*, etc., etc...

B. — *Des types de fours employés.* — On peut distinguer deux types de fours :

1° *Les fours à bassin* qui comprennent deux parties, l'une près de l'autel où la sole se creuse de manière à former une sorte de cuve ou de *bassin*, l'autre légèrement inclinée où la sole descend en pente plus ou moins forte jusqu'au bassin (Voir la figure précédente).

On charge la fonte à l'extrémité, près du rampant, et à mesure qu'elle fond elle se rend dans le bassin près du pont où elle achève de s'échauffer pour prendre la fluidité nécessaire. Le chauffage est donc progressif et la chaleur mieux utilisée. Le bassin est recouvert, afin de concentrer la chaleur, d'une voûte spéciale rendant assez compliqués la construction du four et son entretien.

Si l'on n'a pas soin de bien conduire le travail, la fonte a grande tendance à s'oxyder, car elle reste très exposée à l'action du feu.

On emploie surtout ces appareils en *Angleterre* et ils sont parfois désignés dans nos usines, où ils sont aussi en usage, sous le nom de *fours anglais*.

2° *Les fours à sole plate* sont ceux que nous avons décrits à propos du puddlage dans notre première partie. Dans ces fours, le bain de fonte est peu épais et occupe toute l'étendue du laboratoire.

La sole a une légère pente (10 0/0) dirigée vers la porte de coulée qui est d'ordinaire sur le rampant, la voûte est assez haute (80 cm.) à l'autel pour faciliter le chargement, la surface de la sole est de 2,5 à 3 fois celle de la chauffe. La longueur ne doit pas dépasser 3 mètres ; il faut la réduire si l'on n'a pas de bonnes houilles à longue flamme à sa disposition.

D'une manière générale, le cendrier doit être assez profond pour maintenir sous la grille une masse d'air froid capable d'activer le tirage.

La porte de chauffe doit être assez évasée vers l'extérieur pour per-

Coupe longitudinale.

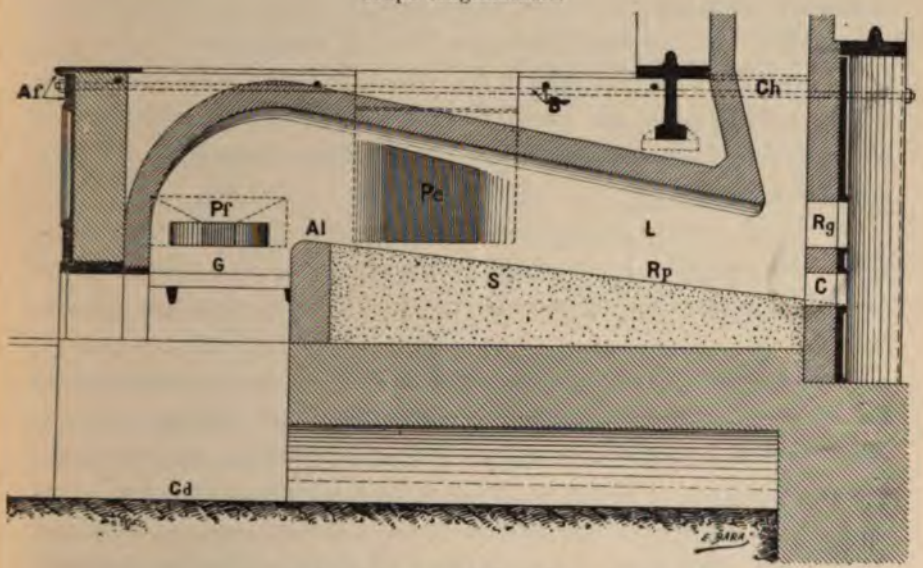


Fig. 15. — Four à réverbère à sole plate.

Af, armature en fonte. — *Pf*, porte de chauffe. — *G*, grille. — *Cd*, cendrier. — *Al*, autel. — *S*, sole en sable réfractaire battu en pisé. — *Rp*, rampe au dixième. — *L*, laboratoire. — *B*, boulons d'armature. — *Ch*, cheminée. — *Rg*, regard. — *C*, trou de coulée. — *Pc*, porte de chargement.

mettre au chauffeur de bien distribuer le combustible sur toute la grille. Sa hauteur au-dessus de la grille qui règle l'épaisseur du combustible est environ de 25 à 30 cm. Cette épaisseur doit être assez grande pour obtenir dans le four une atmosphère non réductrice en même temps qu'une haute température.

La hauteur de l'autel au-dessus de la grille doit être d'autant plus grande que le combustible est à flamme plus longue : on protégera ainsi bien mieux le métal contre l'action directe de la flamme.

La longueur de la sole diminue de l'autel à la cheminée, la voûte s'abaissant en même temps : on réduit ainsi la section du four à mesure qu'on s'éloigne du foyer.

La section du rampant ne doit pas être trop petite pour ne pas ralentir le tirage, ni trop grande pour ne pas amener des déperditions de chaleur.

C. — *Chargement et conduite des fours.* — Sur la sole formée d'une épaisseur de sable réfractaire battu en pisé sur de la maçonnerie, on charge la fonte en *saumons* entassés de manière à laisser passage à la flamme : on complète le chargement avec les débris de vieilles fontes, masselottes, etc... destinés à donner un bain de composition déterminée.

Les morceaux les plus gros et les plus difficiles à fondre sont placés le plus près possible de la grille contre l'autel ; souvent même on les place sur des briques réfractaires pour que la flamme puisse les entourer complètement.

On chauffe ensuite le plus rapidement possible, la grille étant maintenue bien couverte de manière à éviter un excès d'air ; pour la même raison les portes sont fermées et le registre de la cheminée un peu baissé.

Pour améliorer les conditions de la fusion, on peut porter d'abord les *saumons* au rouge dans un petit four chauffé par des flammes perdues, puis on les transportera dans le four à réverbère déjà chaud.

Par ce moyen, on hâtera la fusion et on réduira l'oxydation au minimum. C'est surtout à l'état pâteux que le métal s'oxyde car il est très divisé : une fois liquide, il est presque à l'abri de l'action des flammes, du moment qu'on ne le brasse pas. Le déchet par oxydation varie, en outre, avec la nature des fontes : il est plus grand pour les fontes blanches qui restent pâteuses et aussi pour les fontes noires très dures à fondre.

Parfois on recouvre la fonte de poussier de coke pour empêcher l'oxydation.

Il reste dans le four après la coulée un gâteau de fonte brûlée transformée en fer et qu'on nomme *carcas ;* le poids du carcas peut varier de 0 à 10 0/0 du poids de la charge.

Le déchet total varie de 8 à 15 0/0.

La consommation de charbon est environ le tiers du poids de la fonte à fondre et augmente si l'opération est mal conduite.

Dans les fonderies à grande production et surtout à production continue, on peut avantageusement remplacer le chauffage au combustible solide par le chauffage au gaz. On utilisera à cet effet divers systèmes de fours : *Ponsard*, *Siemens*, etc... dont nous avons parlé dans notre première partie.

La contenance des fours varie de 3 à 8 tonnes : pour de très grosses pièces on utilise plusieurs fours dont on débouche à peu près simultanément les trous de coulée. La fonte est alors conduite dans une grande poche de fonderie où s'opère le mélange des fontes provenant des différents fours.

III. — *Les Creusets.*

A. — *Fours à creusets ordinaires.* — La fonte liquéfiée dans des creusets subit moins d'altération que lorsqu'elle est traitée par tout autre mode de fusion : elle n'est en effet, en contact, ni avec le combustible ni avec l'air atmosphérique.

La fusion de la fonte dans les creusets est très onéreuse et n'est admissible que pour la coulée des petits objets très délicats ou pour servir à la confection de pièces, en cas d'urgence, lorsque les cubilots ne fonctionnent pas et lorsqu'on n'a pas assez de moules préparés pour les faire marcher.

L'emploi des fours à creusets d'une façon courante n'est rationnel pour le travail de la fonte que dans les fonderies se livrant à des fabrications spéciales pour lesquelles le fini de la fabrication et la main-d'œuvre d'usinage ultérieur surpassent beaucoup le prix même de la matière première.

La condition essentielle à remplir dans la fabrication des petits objets est la netteté des contours : on évite dans ce but l'emploi de la fonte très grise, très douce il est vrai, mais trop poreuse pour donner des surfaces unies ; il faudra avoir recours à une fonte légèrement truitée.

Les creusets sont faits en terre mélangée de graphite et contiennent de 15 à 20 kilogrammes de fonte ; on en construit cependant pouvant contenir 50 à 60 kilogrammes : on les chauffe au coke dans des fours à vent, ou à la houille dans des fours à réverbère à laboratoire très petit.

L'opération dure environ 2 à 3 heures.

Un creuset ne fait guère que six à dix fusions.

Dans les grandes usines, rien ne s'oppose à l'emploi des fours à gaz

et notamment des fours *Siemens* pour chauffer les creusets : on prétend que ce mode de chauffage plus rapide et plus régulier les conserve mieux.

Nous ne reviendrons pas sur la description de ces fours que nous avons donnée dans notre première partie à propos d'un des procédés d'élaboration d'acier fondu.

B. — *Fours Piat.* — Il nous reste à parler, pour terminer ce sujet, des fours portatifs oscillants du système *Piat* qui ont paru pour la première fois à l'Exposition de 1878 où ils ont été beaucoup remarqués.

Avec les fours ordinaires actuels, les creusets doivent être enlevés du foyer dès que la matière en fusion est prête pour la coulée. Le travail nécessaire pour sortir les creusets du four n'est pas sans difficultés, ni

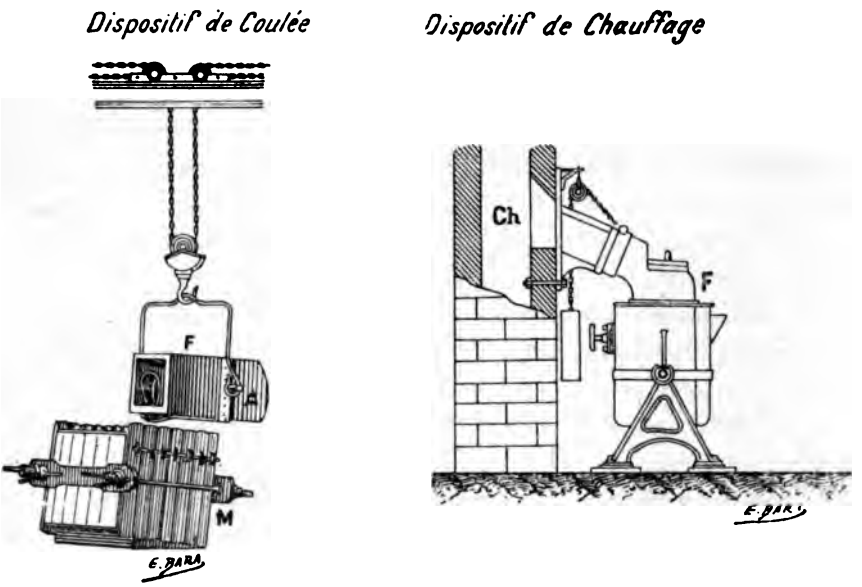


Fig. 16 et 17. — Fours portatifs à creuset, système Piat (types divers).

M, moule composé de plusieurs châssis assemblés et recevant la fonte. — *A*, axe de rotation du four mobile. — *Ch*, cheminée. — *F*, four mobile.

sans dangers. Puis l'opération de coulée terminée, il y a lieu de remettre le creuset en place, de le réchauffer et de reprendre, non sans peine, la marche suspendue momentanément.

Les fours *Piat* sont des fours à vent mobiles, contenus dans des en

veloppes en tôle pouvant basculer sur des tourillons. Le creuset y est calé : on peut donc amener ces fours près des moules et couler directement en inclinant le four.

Les fours *Piat* ainsi que les divers types qui en dérivent sont, paraît-il, assez économiques ; ils peuvent servir en outre dans les fonderies à la fusion d'autres métaux tels que le cuivre, le bronze, etc...

En signalant le dispositif *Piat* nous avons voulu simplement donner une idée générale sur ce genre de *fours-creusets-poches* employés dans un assez grand nombre de fonderies de fonte ou d'autres métaux.

Article 3. — Autres appareils ou accessoires des fonderies

Nous nous proposons de donner une idée générale des autres appareils ou accessoires qu'on rencontre dans les fonderies.

Parmi les différents appareils qui doivent se trouver dans tout atelier de moulage, et dont le nombre et les proportions seront en harmonie avec la nature et l'importance des travaux qu'on y exécute, nous signalerons d'abord les *poches* de *fonderie* au moyen desquelles la fonte se transporte à bras d'hommes ou avec des grues depuis les appareils de fusion jusqu'aux moules où elle doit être versée.

I. — *Des poches de fonderie*

Chaque atelier doit avoir une série de poches de différentes dimensions depuis les plus petites qui peuvent être portées par un ou deux hommes jusqu'à celles dont la contenance plus forte exige des dispositifs spéciaux pour leur transport (grues, roulement sur rails, etc...).

Les poches employées dans les fonderies de fonte ont rarement des dimensions aussi fortes que celles employées dans les fonderies d'acier ; on peut ainsi éviter la manœuvre difficile d'appareils encombrants et coûteux, car on s'arrange, en général, pour que la fonte se distribue plus vite et plus facilement dans un grand moule en la versant par deux ou plusieurs canaux y aboutissant.

Dans les anciennes fonderies on donnait aux poches en fonte de 1 à 4 centimètres d'épaisseur : aujourd'hui on les fait le plus souvent en tôle de fer. Dans ce cas, les poches sont toujours garnies à l'intérieur d'une couche de vieux sable mélangé dans l'eau avec des débris de paille.

Les figures ci-dessous montrent quelques types de poche en usage dans les fonderies.

Les unes peuvent basculer, pour la coulée, à l'aide d'un levier mor-

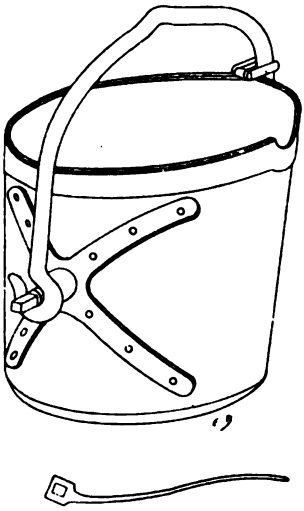


Fig. 18. — Grande poche de coulée basculant au moyen d'un levier.

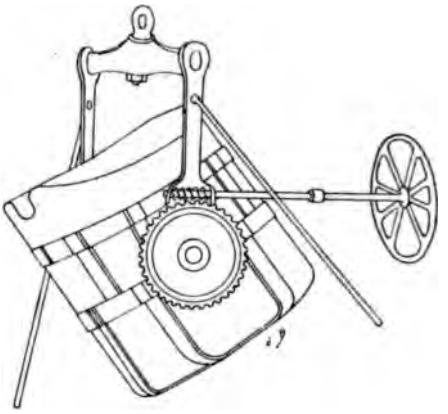


Fig. 19. — Grande poche de coulée basculant par engrenage et vis sans fin.

taisé dans lequel on introduit le tenon terminant une des extrémités de l'axe horizontal de suspension.

D'autres basculent en agissant à l'aide d'un volant sur une vis sans

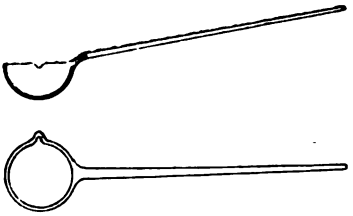


Fig. 20. — Cuiller de coulée

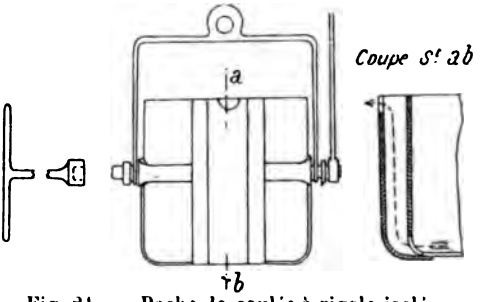


Fig. 21. — Poche de coulée à rigole isolée.

fin qui engrène avec un pignon calé sur l'axe horizontal de suspension.

Dans certaines poches est disposée une cloison verticale percée à sa partie inférieure ; c'est par cette ouverture que passe la fonte avant d'arriver au bec. Quand on n'emploie pas ce genre de tubulure ou de rigole,

il faut continuellement écumer la fonte pendant la coulée, afin d'empêcher les matières étrangères qui peuvent surnager de pénétrer dans les moules.

Nous ne saurions, sans sortir des limites de notre étude, donner la description détaillée des *grues* de modèles variés et suffisamment puissantes pour la manœuvre des moules ou des poches de coulée, dont doivent être pourvus en nombre suffisant les ateliers de moulage. Il importe de signaler toutefois que la bonne exécution de la *manœuvre* doit occuper une large place dans les préoccupations d'un Ingénieur de fonderie.

II. — *Les étuves*

Les moules dans lesquels on coule la fonte sont construits (*sauf pour le moulage en coquille*) en matière réfractaire maintenue dans des châssis métalliques ; il est généralement indispensable de les dessécher complètement avant de procéder à la coulée.

Sans cette précaution on s'exposerait au contact de la fonte liquide à une production brusque de vapeur d'eau qui pourrait les briser et donner lieu à des projections dangereuses de métal fondu.

Le séchage prolongé à haute température a pour effet non seulement de chasser l'eau mais encore de brûler les matières organiques ou les divers poussiers mélangés à la matière réfractaire.

Il se produit ainsi, dans la masse, des pores qui faciliteront, au moment de la coulée, l'évacuation des gaz dégagés par le métal.

Le séchage des moules se fait dans des *étuves* consistant en de grandes chambres en maçonnerie de dimensions très variables, mais souvent comprises dans les limites suivantes : largeur, de 3 à 4 mètres ; longueur, 5 à 6 mètres ; hauteur, 2 à 4 mètres.

Les murs de l'étuve et la voûte sont construits en briques ; la porte également en briques avec revêtement métallique extérieur ou simplement en tôle s'ouvre souvent de bas en haut au moyen d'un contre-poids qui lui fait équilibre.

Des rails et des chariots, des grues sont disposés pour y amener les moules.

Les étuves peuvent être chauffées par des foyers latéraux où l'on brûle le plus souvent du coke : on dispose quelquefois dans la partie supérieure des grandes étuves des foyers spéciaux au-dessus desquels

on range les pièces qui doivent être cuites à haute température. Au lieu d'échauffer directement les étuves on peut utiliser dans ce but la chaleur perdue d'un appareil de combustion quelconque (four à coke, etc...)

Le chauffage en étuve est surtout employé pour les petites pièces ou pour celles de moyennes dimensions. Les très grosses pièces sont souvent chauffées sur place; il est quelquefois impossible de faire autrement. On a eu soin, dans ce cas, de confectionner le moule dans la fosse de coulée où l'on allume de grands feux de bois. On peut aussi

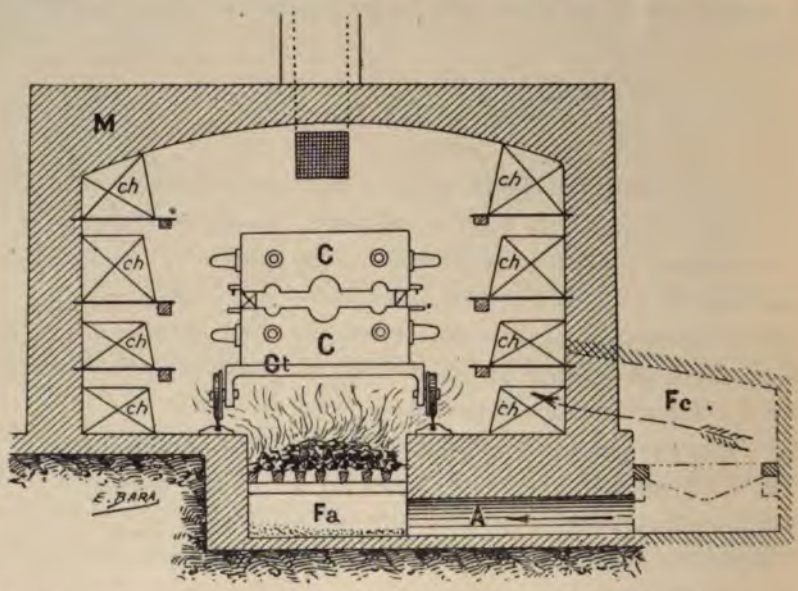


Fig. 22. — Etuve de séchage des moules et noyaux (Disposition avec foyer de côté et foyer axial).

Fc, foyer de côté — *C*, grands châssis chauffés directement par un foyer à grille placé dans l'axe. — *Fa*, foyer axial. — *Ct*, chariot. — *ch*, petits châssis et noyaux de moules placés sur supports pour le séchage. — *A*, arrivée d'air. — *M*, maçonnerie en briques réfractaires.

employer des feux de coke placés dans des corbeilles en fer ou maintenir les moules avec des grues au-dessus des réchauds à coke.

Le séchage sur place n'est pas à recommander, car il est irrégulier: les cendres, les étincelles peuvent, en outre, occasionner des piqûres sur la surface des moules. On peut améliorer ce procédé en établissant près des moules des foyers mobiles à coke, entourés d'une hotte et communiquant par des tuyaux munis de registres avec le fond des châssis : le moule sert alors de cheminée, il est directement traversé

par l'air chaud ; on peut le coiffer de tuyaux d'appel en fonte s'il n'a pas assez de hauteur.

Enfin, il y a lieu de signaler les dispositifs *dits de circonstance* dont nous ne saurions donner le détail, puisqu'ils varient avec l'état des lieux, suivant la nature des fabrications, etc...

CHAPITRE II

PRATIQUE DU MOULAGE

Il faut avant tout pour confectionner un moulage avoir construit un *modèle*. Le modèle est généralement en bois.

Article Ier. — Construction des modèles.

A. — *Généralités sur les modèles en bois.* — Le modèle en bois sert, soit en cet état, ce qui a lieu journellement, soit pour fabriquer un *modèle métallique*. Il n'est cependant pas toujours vrai que pour arriver au modèle en métal il faille forcément passer par le modèle en bois car dans certains cas, et notamment dans les fonderies de cuivre, on peut faire usage de modèles en *plâtre*, en cire ou en toute matière plastique.

On choisit des bois sains, parfaitement secs et de nature à prendre un poli suffisant pour qu'à la sortie du sable ou de la matière réfractaire qu'on aura tassée sur la surface des moules, celle-ci ne soit ni inégale, ni raboteuse, après l'absorption d'une quantité plus ou moins grande d'humidité. Le bois choisi de préférence est le *sapin du Nord*.

Les modèles devant subir un moulage répété et exigeant par suite une grande solidité seront faits en *chêne* ; le *noyer* sera employé pour les très petits modèles de pièces de machines, etc...

B. — *Du retrait.* — La nécessité d'obvier aux effets du retrait de la fonte entraîne l'obligation de donner aux modèles des dimensions telles qu'après complet refroidissement les pièces soient ramenées aussi près que possible de leurs véritables formes.

Le retrait est variable suivant la forme et les dimensions des objets,

suivant la nature et la qualité de la fonte ; ses effets varient quelquefois avec le mode de moulage employé, *il est d'environ* 1 0/0.

Les fontes noires ou très grises prennent moins de retrait que les fontes grises ordinaires ; les fontes truitées prennent plus de retrait que les fontes grises et moins que les fontes blanches.

Une température insuffisante à la coulée ou un refroidissement trop brusque dans le moule accélèrent les effets du retrait, ou tout au moins les rendent très irréguliers.

Dans la pratique, avec une bonne fonte de moulage, on majore les cotes principales des modèles de 9 à 10 millimètres par mètre quand les pièces sont de formes et de dimensions ordinaires, de 7 à 8 millimètres seulement quand elles sont épaisses et massives et de 11 à 13 millimètres quand les pièces sont de grande étendue, d'une épaisseur relativement faible ou fabriquées avec une fonte s'approchant d'assez près de la fonte blanche.

Il faut ajouter que les nombres ci-dessus ne sauraient être adoptés d'une façon absolue, car l'emploi des nervures, plaquettes de consolidation, etc... qu'on enlèvera par burinage sur l'objet moulé peut limiter beaucoup les effets de la contraction et la maintenir, même dans les cas les plus défavorables, aux environs de 10 millimètres.

Le retrait donne souvent lieu à des efforts de tension considérables, et, si ces efforts s'exercent sur des parties trop faibles, ils peuvent en amener la rupture. De là, la nécessité d'artifices de consolidation ou d'exagération dans certaines dimensions qu'on enlèvera au travail d'usinage à froid.

C. — *De la dépouille.* — Abstraction faite des précautions à prendre pour se prémunir contre les effets du retrait, il est encore une chose essentielle dont on doit tenir compte dans le tracé des modèles, c'est la *dépouille*, soit l'évasement à donner aux modèles pour faciliter leur sortie de la matière réfractaire constituant le moule et *ne pas la dégrader.*

Théoriquement un modèle qui serait parfaitement d'équerre (cube, cylindre, etc...) pourvu que sa hauteur ne soit pas trop grande, ne devrait pas avoir de dépouille.

Or, il arrive que, si ce modèle est en bois, ses pores se gonflent à cause de l'humidité du moule contre les parois duquel il glisse difficilement ; s'il est en métal, il est sujet à s'oxyder et adhère davantage. Il en résulte qu'on ne peut se dispenser de la dépouille que pour les objets

de dimensions restreintes dont il est rigoureusement indispensable de ne pas altérer les formes, soit parce que l'on ne veut ou l'on ne peut les soumettre à un travail de rectification par un usinage définitif à froid.

Ainsi, en pratique, le modèle d'un cube ne sera pas un cube géométrique, sa base supérieure aura un côté légèrement plus grand (1) que celui de sa base inférieure, etc...

Dans la plupart des cas, l'usinage de rectification sera inutile et l'objet, avec ses dimensions modifiées du reste dans des limites très étroites, sera presque toujours utilisable par le constructeur.

La dépouille sera souvent avantageusement aidée par un démontage bien entendu des modèles ou par des artifices spéciaux parmi lesquels il faut citer celui des *pièces battues*. Les formes mêmes des modèles nécessitent quelquefois leur démontage ou l'emploi de ces artifices.

La figure 23 représente la section d'une pièce pour laquelle s'est imposé le démontage du modèle ; celui-ci devra être constitué en trois morceaux, *a*, *b*, *c*, ainsi que l'indique la figure 24.

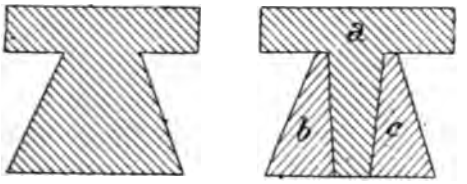


Fig. 23 et 24.
a, *b*, *c*, fractions du modèle.

La figure 25 représente une portion de moulage en deux châssis C avec *pièce battue* B. Une pièce battue est un morceau rapporté en sable un peu gras qui lui donne de la résistance et venant compléter le moule en s'adaptant à l'intérieur des châssis contre une portion de la surface du modèle M.

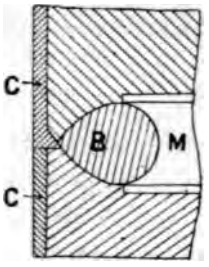


Fig. 25.
C, châssis. — *M*, modèle. — *B*, pièce battue.

Le retrait et la dépouille conduisent à donner au modèle des dimensions un peu différentes de celles de l'objet fini : il faudra, en outre, tenir compte d'autres modifications résultant de la surépaisseur à laisser en certains points pour permettre le travail du tour ou de l'ajustage, cette surépaisseur variant en pratique entre 5 et 10 millimètres.

D. — ***Modèles en métal, plâtre***, etc... — On fait généralement en

(1) Pour un cube de 0 m. 50 de côté, l'excès des côtés serait d'environ 2 mm.

métal les modèles des pièces devant être moulées un grand nombre de fois ou de celles qui sont trop minces et trop faibles pour supporter sans inconvénients un nombre même limité de moulages successifs.

Le métal ordinairement employé est la fonte ; cependant on se sert aussi du cuivre, du bronze, du laiton ou autres alliages.

Le plâtre est quelquefois employé dans les fonderies ; soit pour certains modèles spéciaux d'ornement, car il se coupe mieux que le bois, présentant ainsi des angles plus vifs et des surfaces plus nettes, soit pour renforcer, compléter, allonger des modèles en bois en vue d'essais ou pour corriger des modèles qu'on ne veut pas refaire.

Dans tous les cas on donne de la dureté à la surface du plâtre en l'enduisant d'une ou plusieurs couches d'huile siccative.

La cire est employée dans les modèles pour fonte de bronze appliquée à l'ornementation et à la statuaire ou pour le moulage dit *en cire perdue* dont il sera dit quelques mots ultérieurement.

Article 2. — Moulage en sable et en terre

Le moule se prépare toujours en *battant la matière réfractaire* (sable ou terre) *autour du modèle* représentant la pièce à fabriquer.

La matière réfractaire épouse toutes les formes du modèle et lorsqu'on retire celui-ci elle en conserve l'empreinte, si elle a été battue assez énergiquement pour bien se comprimer et s'agglomérer.

1. — *De la matière réfractaire constituant le moule*

La matière réfractaire constituant le moule peut être le sable ou la terre.

A. — *Moulage en sable.* — Le moulage en sable est le plus employé. Le sable à mouler devra être quartzeux pour qu'il soit infusible, mêlé d'un peu d'argile pour qu'il ait après légère humectation la plasticité nécessaire : s'il était trop argileux, il se fendillerait sous l'action de la chaleur. Le sable de carrière remplit à peu près les conditions que nous venons d'énumérer.

Quelquefois et suivant la qualité du sable, on lui ajoute une faible proportion de matière organique et de 5 à 25 0/0 de coke broyé ou

tamisé. Dans les grandes fonderies, le mélange est fait au moyen de *broyeurs* et de *malaxeurs* qui assurent à la masse une homogénéité parfaite très nécessaire pour la bonne réussite des pièces.

En général, les matières ajoutées aux sables ont pour but soit de faciliter leur agglutination, soit de les rendre plus poreux après dessiccation.

Le sable peut être employé sous trois états : *vert, sec, recuit ou étuvé.*

a). — *Sable vert.* — Le sable vert est celui qui sort de la carrière et ne subit pas de préparation. L'inconvénient de son emploi résulte de l'excès d'humidité qu'il apporte : pour y obvier, on ménage dans le moule une série de petits canaux ou évents dont le but est de faciliter le dégagement de la vapeur d'eau. Malgré ces précautions, un tel sable est à proscrire pour les moulages à grandes épaisseurs si l'on veut se mettre complètement à l'abri des explosions.

Le sable humide provoque, en outre, à la surface de la fonte un refroidissement rapide qui la trempe et la durcit toujours un peu.

b) — *Sable sec.* — Pour les grosses pièces on commence d'abord par confectionner un moule en sable vert, puis on le sèche ensuite avec des gueuses de fonte portées au rouge ou avec un feu de charbon de bois.

On obtient ainsi une plus grande sécurité pendant la coulée à cause de l'élimination de la plus grande partie de la vapeur d'eau et une surface plus douce pour l'objet moulé puisque la cause principale du refroidissement a disparu.

c) — *Sable recuit ou étuvé.* — Le sable recuit ou étuvé convient pour les pièces de dimensions moyennes qui doivent être finies et dont la surface doit rester douce pour bien se prêter au travail d'usinage. Le sable destiné à être étuvé pourra être légèrement plus gras que dans le cas du moulage en sable vert ou sec.

Le moule est ensuite porté à l'étuve où on peut le chauffer plus ou moins, quelquefois jusqu'au rouge, dans les conditions que nous avons antérieurement spécifiées.

Le procédé au sable recuit ou étuvé est celui qui est le plus généralement employé quand on veut réaliser une fabrication régulière, exempte d'accidents et de malfaçons.

Dans tous les cas, que le moulage soit en sable vert, sec ou étuvé, il faut recouvrir sa surface d'un enduit spécial à base de charbon pour empêcher à la coulée les infiltrations de la fonte et diminuer l'adhérence du métal avec le sable dont le moulage est constitué.

Les moules en sable vert ont leurs parois saupoudrées avec du poussier de charbon de bois : l'ouvrier le répand en secouant au-dessus du moule un sac d'un tissu peu serré laissant tamiser ce poussier.

Pour les moules en sable séché ou étuvé on ne se contente pas de les lisser au poussier ; on badigeonne leur surface à l'aide d'un pinceau, avec un enduit formé de plombagine ou de poussier de charbon de bois, d'un peu d'argile ou de fécule cuite, le tout délayé dans l'eau.

Après que le badigeon a été étendu, on lisse avec soin toutes les parties du moule afin d'éviter les traces du pinceau, de la brosse ou de la queue d'étoupes dont on s'est servi pour passer la couche.

B. — *Moulage en terre.* — La terre s'emploie aussi pour mouler sur modèle, mais plus rarement ; c'est un procédé plus rapide, plus facile, donnant toutefois des résultats moins parfaits que le moulage en sable. L'emploi de la terre peut être combiné avec celui du sable pour faciliter l'exécution des *pièces de rapport* ou *pièces battues* dont il a été question plus haut.

On emploie pour ce moulage des terres assez grasses pour qu'elles se lient facilement, mais ne contenant pas une trop grande quantité d'argile qui, faisant fendre les parois des moules, exigerait un séchage dispendieux, quelquefois même un recuit. En général, plus les terres sont argileuses, plus leur dessiccation présente de difficultés, plus leur retrait est grand et plus elles sont disposées à se crevasser pendant le séchage. Les terres convenant le mieux sont les terres rouges appelées *erbues ;* les terres grises qui sont calcaires ne prennent pas assez de consistance. Quelles que soient les terres employées on y joint une proportion variable de bourre hachée ou de crottin de cheval dont la présence est utile pour empêcher les moules de se fendre et pour faciliter le passage des gaz.

Il n'est cependant pas tout à fait exact de considérer le moulage en terre comme un moulage en sable, à cela près que la matière réfractaire constituant le moule est différente.

Par *moulage en terre* on entend le plus souvent un moulage dont la matière réfractaire constituant le moule est bien en terre, mais qui, réservé seulement pour de fortes pièces dont le moulage ne doit avoir généralement lieu qu'une fois, a été exécuté *sans modèle*, à l'aide d'artifices spéciaux et *sans châssis*, c'est-à-dire sans ossature métallique extérieure servant d'enveloppe à la matière réfractaire du moule.

Nous donnerons plus loin un exemple qui permettra de se rendre compte exactement de cette façon de procéder.

II. — *Des châssis*

A. — *But et description des châssis.* — Nous savons qu'un moule est constitué par une matière plastique au sein de laquelle on a pratiqué une empreinte à l'aide d'un modèle dont on lui fait épouser toutes les formes et qu'on a retiré ensuite.

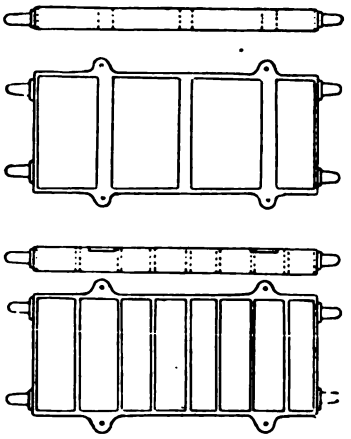


Fig. 26. — Châssis ordinaire.

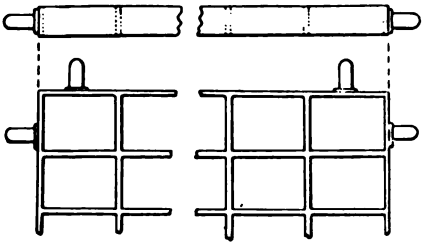


Fig. 27. — Châssis quadrillé ou à compartiments.

Cette matière plastique, sable ou terre, doit généralement être maintenue par une enveloppe rigide extérieure en fer ou en fonte contre laquelle elle doit adhérer et qui est constituée par un ou plusieurs châssis assemblés les uns aux autres.

Les châssis sont des cadres en *fer* ou en *fonte* dont les côtés peuvent être reliés par des tringles formant une espèce de grillage ou par des traverses d'une certaine hauteur; ces traverses peuvent elles-mêmes se rejoindre par des croisillons faits avec des sortes de crochets appelés clous de mouleur.

Fig. 28. — Ferrures d'assemblage de châssis, dites clous de mouleurs.

Ainsi, le fond du cadre forme une sorte de carcasse métallique à laquelle le sable peut s'accrocher; une fois bien battu, ce sable y adhère et constitue avec lui une masse solidaire qu'on peut enlever et manier sans qu'il y ait danger de dégradation pour le moule. Chaque fois qu'on a beaucoup de pièces à mouler sur le même modèle, on fait des châssis spéciaux parfaitement appropriés à la forme des moules qu'ils doivent contenir;

mais on a généralement des séries de châssis permettant, sauf de rares exceptions, de mouler toutes les pièces qui peuvent se présenter.

Lorsqu'on ne veut pas trop multiplier les châssis (ce qui revient très cher), on emploie les châssis dits « *mille pièces ou universels* » constitués par un grand nombre de plaques boulonnées entre elles et reliées aux angles par des équerres. A l'aide d'une proportion suffisante de plaques de longueur et de hauteur variables, on forme sans difficulté des capacités de toute grandeur.

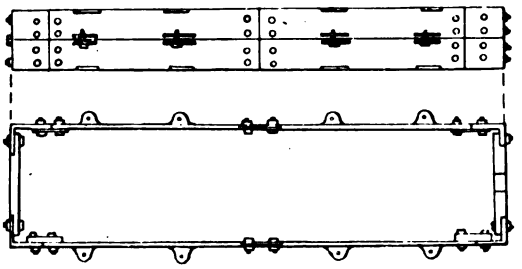


Fig. 29. — Châssis démontable, dit « mille pièces ».

Les châssis portent sur leurs côtés des oreillettes pour les soulever, des pattes avec des boulons clavetés pour les réunir : il faut les repérer avec le plus grand soin afin de les superposer exactement quand on les rassemble pour constituer le moule.

Les châssis portent aussi et alternativement des tenons et des mortaises qui s'emboîtent les uns dans les autres quand on superpose deux châssis: on peut aussi placer sur le côté des cadres des glissières verticales où s'engagent des tenons en queue d'aronde fixés au cadre voisin.

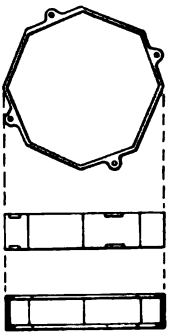


Fig. 30. — Châssis pour moulage de petites pièces.

B. — *Moulage à découvert.* — Dans bien des cas, pour des pièces de formes simples, on peut supprimer les modèles, réduire le nombre des châssis *en utilisant le sol même de la halle de la fonderie*, comme surface de moulage.

C'est le *moulage à découvert ;* un exemple suffira pour fixer sur ce procédé spécial.

S'agit-il, par exemple, de couler une plaque de fonte, on commence par établir dans le sol de la fonderie une surface bien unie qui prend le nom de *couche* et est limitée par deux *chantiers* parallèles posés horizontalement et dans le même plan.

L'ouvrier peut alors, au moyen de règles ou d'équerres, former les angles et les côtés du moule de la plaque.

L'épaisseur voulue s'obtient en établissant sur les bords du moule des *déversoirs* par lesquels la fonte s'écoule dès qu'elle a atteint le niveau qui ne doit pas être dépassé.

Le moulage à découvert peut s'appliquer à la confection de *marteaux*

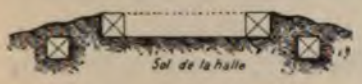


Fig. 31. — Exécution d'un moulage à *découvert* (plaque de fonte).

Fig. 32. — Exécution d'un moulage à découvert de plaque de fonte à *ergot*, avec modèle pour l'ergot.

de forge, enclumes, plaques de dallage, châssis de fonderie, etc.....; en un mot, de toutes les pièces dont la surface supérieure n'a pas besoin d'être parfaitement unie. Rien ne s'oppose aussi à ce qu'une partie du moule soit confectionnée avec un modèle, ainsi que l'indique la figure 32 représentant le dispositif du moulage d'une plaque *moulée à découvert*, mais avec ergot saillant réservé spécialement par un modèle.

III. — *Les noyaux.*

La confection d'un objet creux ne peut être réalisée qu'en suspendant dans le moule des pièces spéciales destinées à occuper, pendant la coulée, le vide qui devra exister dans la pièce finie. Ces pièces portent le nom de *noyaux*.

Les noyaux doivent être poreux pour faciliter le dégagement de l'air et se contracter pendant le refroidissement de la fonte : on les fait le plus souvent en terre ou en sable gras, les couches intérieures étant mélangées de paille hachée ou de matières organiques appliquées sur une ossature métallique.

Lorsque les noyaux ont des formes géométriques simples on les fait en terre appliquée sur des pièces cylindriques, coniques, en fer ou en fonte, appelées *lanternes* ou *axes*.

A. — *Lanternes.* — Les lanternes servent pour les noyaux de grosses dimensions : ce sont des tubes cylindriques ou coniques, en fonte ou en tôle, montés sur des tourillons et percés d'une multitude de petits trous destinés à laisser échapper les gaz qui se dégagent pendant la coulée.

Un toron de chanvre ou de foin filé est interposé entre la lanterne et le sable de moulage, pour que ce dernier ne puisse s'introduire dans les trous et les boucher.

On met ensuite la quantité de terre suffisante et l'on porte ces lanternes sur un tour qui les amène au diamètre voulu ; enfin les noyaux sont séchés à l'étuve et placés dans le moule.

Le chanvre ou le foin brûlent à l'étuvage, rendant ainsi le noyau plus poreux.

B. — *Axes.* — Pour les noyaux d'un petit diamètre, on remplace les lanternes creuses par des *axes* pleins en fonte ou en fer garnis ou non de cannelures longitudinales et *pourvus de tourillons* quand ils doivent être tournés ; *sans tourillons*, quand le noyau est fait en sable dans une *boîte à noyau* dont l'usage est décrit ci-après. Les noyaux de tous les tuyaux sont faits avec des lanternes ou des axes ; il en est de même de ceux des anciens projectiles en fonte, etc.

C. — *Boîtes à noyaux.* — Au lieu d'amener les noyaux cylindriques ou coniques aux dimensions exactes par un travail de tournage, on

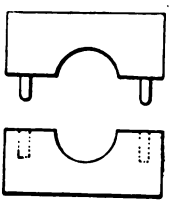


Fig. 33.

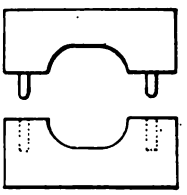


Fig. 34.

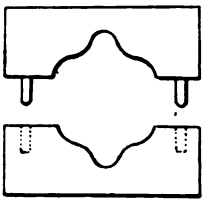


Fig. 35.

peut les obtenir directement par voie de moulage quand leurs dimensions ne sont pas trop fortes ou quand leur forme est compliquée. On tasse dans ce but le sable dans des moules spéciaux souvent en bois, quelquefois métalliques, appelés *boîtes à noyaux* et on emploie pour cela du sable d'étuve de la meilleure qualité.

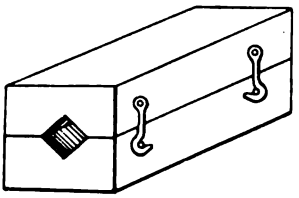


Fig. 36.

Les boîtes à noyaux destinées à la confection des noyaux réguliers sont des plus simples. Pour les noyaux cylindriques, elliptiques ou de section régulière quelconque à parties

arrondies, elles se divisent en deux parties suivant un plan passant par l'axe et perpendiculaire aux bases.

Chacune des deux moitiés est creusée d'après un calibre représentant la demi-section du noyau.

Les figures 33, 34 et 35 indiquent cette disposition.

En général, dès qu'un noyau régulier de forme même simple présente quelques nervures ou quelques saillies pouvant rendre le démoulage difficile, on rend les côtés démontables, de façon à faciliter la sortie du noyau sans arrachement des arêtes.

Nous ne signalons que pour mémoire les modèles de boîtes à noyaux à parties mobiles, dites *boîtes universelles* permettant d'obtenir à volonté, soit des octogones réguliers ou irréguliers, soit des hexagones, des carrés, etc...

Les boîtes à noyaux permettent aussi d'obtenir des noyaux plus ou moins longs au moyen de parties mobiles rapportées ; on fait alors courir dans la boîte une partie pleine qui se déplace suivant le besoin.

Les boîtes à noyaux sont repérées par des goujons ou des tenons, indépendamment des vis ou des crochets qui servent à les tenir fermées.

IV. — *Les planches à trousser.*

Toutes les fois que les pièces à mouler présentent la forme d'une surface de révolution à génératrice plus ou moins compliquée, on emploie ce qu'on appelle le *moulage à la trousse*, et qui consiste à faire tourner sur un pivot un volet découpé suivant la surface de la pièce à obtenir.

Les trousses, trousseaux ou planches à trousser reproduisent fidèlement les profils des noyaux ou des pièces à exécuter : ils doivent être tracés, comme les modèles, en tenant compte du retrait. La face qui travaille, c'est-à-dire celle qui reçoit la terre et son biseau ont besoin seulement d'être rigoureusement dressés. Une même planche servant à trousser peut porter au besoin deux profils, surtout si ces profils appartiennent à l'intérieur et à l'extérieur d'une pièce devant être exclusivement obtenue par *troussage*.

Les planches à trousser ordinairement en chêne ont une épaisseur de 3 à 4 centimètres et sont souvent renforcées en plusieurs points afin de les empêcher de fléchir sous la pression de la terre ; elles sont

disposées, soit pour le troussage horizontal, soit pour le troussage vertical.

On garnit souvent les planches à trousser de minces lames de fer ou de tôle fixées sur la partie qui, par le travail, tend à s'user et à se fendiller assez vite. Cette partie amincie et taillée en biseau, à 45° environ, laisse un tranchant presque aigu qu'on protège ainsi contre le frottement des matières, sable ou terre, soumises au troussage. Le biseau est indispensable pour faciliter l'écoulement des matières sous la trousse.

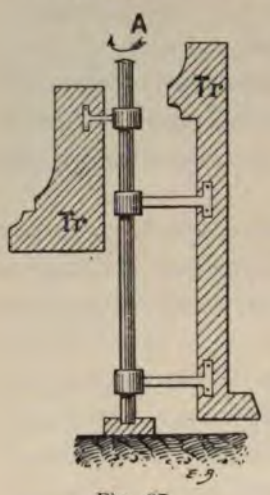


Fig. 37.
A, axe. — *Tr*, trousse.

Pour pouvoir pratiquer en des points déterminés du profil des parties rentrantes qu'une trousse à profil simple ne saurait donner, on peut ménager sur celle-ci des mortaises dans lesquelles se meuvent à coulisse des parties accessoires qu'on enlève ou qu'on descend, qu'on avance ou qu'on recule à volonté et qui sont rendues fixes à l'aide d'un boulon ou d'une vis de pression.

Les planches à trousser sont faites en fonte lorsqu'elles sont destinées à un usage continu ; dans ce cas, leur épaisseur varie entre 1 cent. ou 1 cent. 1/2, quitte à les renforcer par des nervures sur la face opposée à la face de travail.

Les trousses servent donc au moulage des pièces et des noyaux exécutés en tout ou en partie avec le sable, la terre et même le plâtre. Elles peuvent aussi contribuer au finissage des noyaux exécutés en partie dans des boîtes à noyaux.

La figure ci-contre donne une idée de cette manière de procéder.

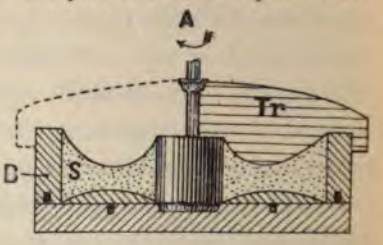


Fig. 38.
A, axe. — *B*, boîte à noyau. — *Tr*, trousse. — *S*, sable.

Le noyau à obtenir, en sable ou en terre, consiste en une couronne foulée dans une boîte à noyaux en bois dont la partie supérieure n'est pas recouverte. La forme en gouge est donnée à la partie inférieure par des bossages en bois ménagés dans la boîte elle-même ; mais, à la partie supérieure, c'est le troussage

horizontal qui doit la réaliser. A cet effet, on dispose d'une planche à trousser s'appuyant sur le rebord de la boîte et pouvant tourner autour d'un axe vertical.

Nous n'avons pas la prétention d'avoir décrit tous les dispositifs ou artifices employés dans les fonderies pour l'exécution des moulages ; on pourra consulter avec fruit « *La Fonderie en France* », de *Guettier*, ouvrage très complet, très répandu dans les usines à fonte et qui nous a été fort utile pour traiter un sujet par lui-même fort complexe.

Les exemples ci-dessous compléteront les notions précédentes.

V. — *Description de quelques cas simples.*

A. — *Moulages avec des châssis.* — Nous prendrons comme exemple le moulage d'une *grenade d'obus à mitraille* (1).

Le moule est composé d'autant de parties qu'il est nécessaire pour assurer un démoulage facile. Chaque partie est constituée par un châssis métallique, à l'intérieur duquel on fait adhérer le sable de moulage en opérant comme il suit :

Le châssis supérieur C_1 est retourné sens dessus dessous et placé *sur une planche à mouler*. On y ajoute un faux arbre *a*, destiné à centrer le modèle en bronze de la surface extérieure de la grenade et à tenir la place que prendra plus tard la *lanterne* du noyau.

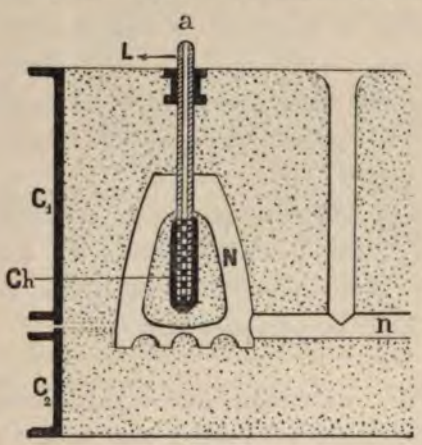


Fig. 39.

L, lanterne. — C_1, châssis supérieur. — C_2, châssis inférieur. — *a*, faux arbre. — *N*, Noyau. — *Ch*, chanvre.

Le vide compris entre le modèle et le châssis est rempli de couches successives de sable qu'on tasse continuellement avec une spatule jusqu'à ce qu'il arrive au niveau *mn*. On retire alors le modèle qui laisse son empreinte dans le sable.

(1) La grenade d'un obus à mitraille est le récipient métallique contenant la charge destinée à le faire éclater. Cette charge intérieure est enflammée par le jet de flamme produit par la fusée après fonctionnement de son appareil percutant ou fusant.

Le châssis inférieur C_2 reçoit l'empreinte de la face inférieure de la grenade en procédant de la même manière que ci-dessus. Le niveau du sable est arasé suivant *mn*.

Le noyau N a été préparé à part en agglomérant du sable ou de la terre autour de la lanterne débouchant dans l'intérieur d'une boîte à noyau dont la paroi interne affecte la forme du vide intérieur de la grenade.

La portion de la lanterne pénétrant dans le noyau est percée de trous destinés à faciliter le dégagement des gaz. Un toron de chanvre est interposé entre la lanterne et le sable de moulage pour éviter que ce dernier ne s'introduise dans les trous et ne les bouche. Le chanvre brûle à l'étuvage et rend le noyau plus poreux.

Le tassage à la main du sable dans les châssis doit être parfaitement régulier pour donner un moulage sans défauts : il faut, pour cette opération, des ouvriers très exercés.

On procède ensuite au séchage après avoir badigeonné, avec un enduit le plus souvent à base de plombagine, les diverses surfaces du moule.

D'une façon générale, nous rappelons qu'on peut simplement sécher à l'air, ou bien extérieurement à l'aide d'un foyer auxiliaire, ou à l'étuve vers 500°.

Les différentes parties du moule sont ensuite montées les unes sur les autres, les châssis sont reliés solidement entre eux par des clavettes : cette opération prend le nom de *remmoulage*.

Tout est prêt pour la coulée.

B. — *Moulage en terre proprement dit.* — Nous prendrons comme type de pièce à mouler une pièce d'assez grandes dimensions dont la surface extérieure soit de révolution et en forme de cloche pour fixer les idées. (Voir le Traité de Guettier).

Nous avons dit plus haut que le moulage en terre s'employait principalement pour toutes pièces à sections régulières pouvant s'obtenir sans modèles, au moyen de trousses par exemple, et pour un grand nombre de gros objets se présentant rarement et dont les dimensions exigeraient un appareil de châssis long et dispendieux.

Une fosse est tout d'abord préparée dans le hall de la fonderie : elle est destinée à recevoir l'appareillage nécessaire à la confection du moule ; on la sèche ensuite à très grand feu.

Le moulage en terre proprement dit comprend en général trois opérations principales :

L'établissement du noyau;
L'établissement de la fausse pièce ;
L'établissement de la chape.

(a) *Etablissement du noyau.* — Pour établir le noyau, construire tout d'abord une sorte de calotte en briques ou en pisé en y ménageant les évents nécessaires communiquant avec l'air extérieur, afin de faciliter le dégagement des gaz qui se produiront à la coulée.

Recouvrir cette calotte de terre argileuse par couches successives qu'on séchera au fur et à mesure, et très progressivement, pour qu'elles ne se fendillent pas; cette épaisseur de terre argileuse sera modelée extérieurement avec un gabarit tournant autour d'un axe vertical appelé *trousseau* ou *planche à trousser;* puis badigeonner ce noyau. Sécher enfin le noyau.

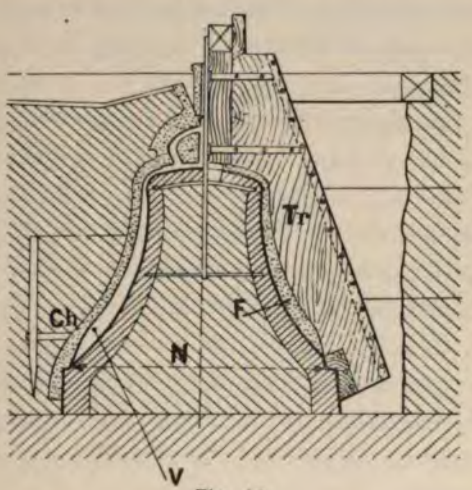


Fig. 40.

N, noyau — *F*, fausse pièce. — *V*, vide obtenu après l'enlèvement de la fausse pièce. — *Tr*, trousseau en bois. — *Ch*, chape.

(b) *Etablissement de la fausse pièce.* — La *fausse pièce* consiste en une pièce en sable recouvrant le noyau et qui n'est autre chose que l'objet à reproduire fait en sable au lieu d'être fait en fonte.

C'est en somme le modèle en sable de l'objet à reproduire et coiffant son noyau.

Pour confectionner la fausse pièce, on recouvre le noyau d'une couche de sable sec devant réserver l'épaisseur convenable en tenant compte du retrait et dont la surface extérieure sera celle de l'objet à reproduire ; cette surface extérieure sera obtenue à l'aide d'un autre *trousseau ou planche à trousser* à profil convenable.

(c) *Etablissement de la chape.* — Puisque la fausse pièce n'est pas autre chose qu'un modèle, il faudra, tout autour de ce modèle coiffant

son noyau, tasser plusieurs assises de terre épaisse étendues en les pétrissant avec les doigts en vue de laisser des empreintes utiles pour lier les différentes couches entre elles et les empêcher de se gercer.

Ce sont ces dernières couches de terre réfractaire appliquées sur la fausse pièce qui constituent la *chape*, sorte de seconde calotte dont l'épaisseur sera augmentée suivant les dimensions de l'objet à couler.

Les chapes peuvent être en plusieurs morceaux ou tiroirs qui se retirent par côtés, qu'on assemble par clavetage et qu'on cercle solidement.

On combinera tous ces artifices suivant les formes à obtenir.

La chape est munie d'un anneau de fonte armé de poignées qui permettent de la soulever à l'aide d'une grue. Cet anneau, relié à la chape, est taillé en biseau et s'engage dans un anneau fixe pour assurer le centrage.

La chape étant retirée à l'aide de la grue, on gratte le sable formant la fausse pièce ; *ce qui revient à enlever le modèle*, opération à faire dans tout moulage. On répare alors le noyau et on le recouvre comme de coutume de l'enduit dont le but est d'en boucher les pores et d'empêcher à la coulée l'adhérence de la fonte. On badigeonne également la surface intérieure de la chape.

Cela fait, on procède au séchage du noyau et de la chape, puis on remet la chape en place au-dessus de son noyau. Le vide existant maintenant entre la chape et le noyau, puisque la fausse pièce a été détruite, représente exactement la capacité que la fonte remplira à la coulée.

On a eu soin de laisser à l'entour du noyau une assise ou *meule* formant un cône tronqué dont la base supérieure dépasse de quelques centimètres celle de la pièce moulée. Cette *meule* sert de repère à la chape qui vient s'y ajuster à frottement, conservant ainsi entre elle et le noyau un vide dont l'épaisseur est parfaitement régulière.

C'est sur la *fausse pièce* qui occupe provisoirement la place du métal, que les fondeurs disposent les modèles en cire des ornements, inscriptions, etc...

Sur la fausse pièce ainsi munie de ces reliefs en cire, on battra la matière réfractaire de la chape, cette matière réfractaire recevra l'empreinte de ces reliefs. La chape sera ensuite soulevée emportant la cire qui aura adhéré à la terre grasse dont elle est constituée ; cette cire fondra au séchage.

Dans le cas du moulage en châssis avec modèles en bois, ces reliefs en cire sont placés au-dessus des modèles en bois eux-mêmes.

Disons à ce sujet que les moules en plusieurs pièces ne peuvent pas donner des formes parfaites (*cas des moulages d'ornement*), les sutures sont visibles et doivent être enlevées à la lime. La fonte à *cire perdue* présente l'avantage de donner un moule fait d'un seul morceau et de reproduire rigoureusement et sans retouche l'œuvre du sculpteur lui-même.

On fait d'abord un moule provisoire et un noyau, ce noyau est gratté puis recouvert d'une couche de cire; on a ainsi une reproduction grossière de l'œuvre. Le sculpteur retouche la cire et donne le modèle définitif. On se sert du noyau comme modèle pour battre dessus un moule en sable d'un seul bloc. Le tout est porté à l'étuve et chauffé jusqu'à ce que la cire soit fondue et écoulée. Elle laisse le vide qui sera rempli par la fonte et qui permettra de reproduire exactement le modelage en cire.

C. — *Machines à mouler ou moulage mécanique.* — Lorsqu'une fonderie doit livrer des milliers de fois la même forme, le prix du modèle n'a plus d'importance et l'on a intérêt à employer des modèles ou des calibres métalliques.

On peut, en outre, faciliter le moulage dans chaque cas particulier par des procédés mécaniques qui permettent de placer les modèles, de les retirer rapidement, de tasser les sables dans les châssis, etc... Quand il y a des saillies qui empêchent la pièce d'être de dépouille, on peut les former avec des pièces mobiles qui restent dans l'intérieur du modèle au moment du démoulage.

Les machines employées pour le moulage mécanique vont généralement par paires, l'une étant employée à la fabrication des moules et l'autre à celle des noyaux : elles peuvent être manœuvrées à la main ou à la vapeur.

Nous ne saurions décrire ici, *même à titre de spécimen*, les divers organes d'une machine à mouler ; les types variant à l'infini selon la nature, les dimensions, etc... de l'objet en fabrication.

Article 3. — Moulage en coquille

I. — *Définition.*

La fonte refroidie brusquement subit une sorte de trempe dont l'énergie va en décroissant rapidement à partir de la surface et qui a pour effet de rendre le métal plus dur *à la lime, plus résistant à la pénétration* d'un corps dur, mais aussi *plus fragile*. Cette fragilité est d'autant moindre que la transition entre la partie du moulage devenue blanche par la trempe et celle restée grise est plus sensible, et c'est à ménager cette transition que l'on s'applique dans les fonderies.

On met à profit cette propriété du durcissement ainsi acquis par la trempe dans la fabrication de certaines pièces dont la surface doit être aussi dure que possible (*anciens obus de rupture, voussoirs de coupole, roues de wagon, cylindres de laminoirs*, etc...) soit pour résister à des chocs violents, soit pour résister à l'usure des frottements répétés.

A cet effet on constitue le moule, en entier ou en partie, par des châssis ou lingotières en fonte appelées *coquilles* d'une assez grande épaisseur pour que le métal fondu cède rapidement à leur contact une partie de sa chaleur et se solidifie en prenant la trempe qu'on recherche. C'est ce qu'on appelle le *moulage en coquille*.

Parmi les usines qui ont acquis dans cette fabrication une réputation méritée, nous pouvons citer : en *France*, celles *de Saint-Jacques, à Montluçon* (Société Châtillon et Commentry) ; *de Terre-Noire* (Loire), aujourd'hui disparues ; en *Allemagne*, l'usine de *Gruson* près de *Magdebourg*, etc...

Les moulages en fonte trempée ont perdu aujourd'hui beaucoup de leur importance depuis qu'on a pu élaborer des aciers spéciaux à grande résistance ; c'est ainsi que les obus de rupture en acier chromé forgé et trempé se sont substitués définitivement aux anciens obus en fonte trempée. Néanmoins ce procédé de fabrication offre encore un intérêt assez grand pour que nous le décrivions avec quelque détail.

II. — *Des conditions de la trempe.*

Les trois éléments qui règlent le degré de trempe sont :

La nature de la fonte, avant tout ;

L'épaisseur de la coquille ;

La température qu'on donne au moule avant la coulée.

a) Pour ce qui concerne la nature de la fonte employée, il importe de retenir que la fonte grise ne prend que très difficilement la trempe ; la fonte truitée la prend plus ou moins. Pour les pièces qu'on veut énormément durcir on emploiera des fontes truitées clair ou presque blanches, riches en manganèse si c'est possible. Le manganèse augmente beaucoup l'énergie de la trempe ; lorsque les fontes sont trop manganésées, la surface se prend en aiguilles ou sortes de lamelles n'adhérant pas au centre de la pièce. Avec des fontes peu manganésées, on obtiendra une trempe à grain serré, plus homogène.

b) Pour ce qui concerne l'épaisseur de la coquille, on admettait autrefois que les coquilles devaient avoir une épaisseur égale au tiers du diamètre de la pièce : on leur donnait 25 à 35 cm.

On emploie de préférence aujourd'hui des coquilles plus légères de 5 à 12 cm. d'épaisseur frettées par des cercles de fer : leur dilatation est plus régulière et leur résistance aux efforts de tension très satisfaisante. Cependant, quand on veut une trempe très forte (*et c'était le cas des anciens obus de rupture dits en fonte trempée*) l'épaisseur de la coquille peut atteindre la moitié ou les trois quarts de la plus grande dimension transversale de l'objet à tremper. Quand la coquille est trop mince, les moulages ne sont pas sensiblement durcis, ils sont simplement à grain très serré ; on coule ainsi des cylindres, des arbres, etc..... Dans ce cas, la coquille mince est enterrée dans le sable, en châssis ou dans une fosse.

c) Pour ce qui concerne la température du moule avant la coulée, il est clair que plus elle sera élevée moins sera sensible l'énergie de la trempe : on aura ainsi un moyen avec des coquilles d'épaisseur donnée de la faire varier dans certaines limites.

III. — *Procédés de fabrication.*

Nous prendrons quelques exemples simples afin de fixer plus sûrement les quelques principes qui régissent cette fabrication spéciale.

A. — *Cas d'un cylindre de laminoir.* — On coulait *pleins* autrefois les cylindres de laminoirs : or, le retrait de la masse intérieure tend à déchirer la surface solidifiée tout d'abord. Lors même que les fentes ne sont pas apparentes après le démoulage, il subsiste des tensions anormales qui peuvent amener l'éclatement spontané de la pièce.

Nous verrons ultérieurement, au sujet de la forme à donner aux lin-

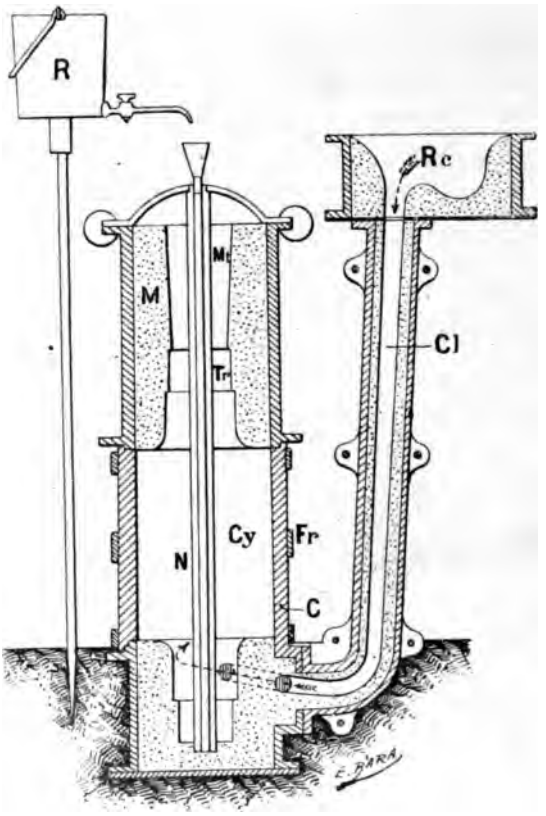


Fig. 41.

R, réservoir d'eau — *M*, moule en sable. — *Mt*, masselotte à enlever après le démoulage. — *Tr*, tourillon. — *N*, noyau. — *Cy*, cylindre. — *Fr*, frette. — *C*, coquille. — *Cl*, canal de la coulée en source. — *Rc*, réservoir de coulée.

gotières pour acier, quel est l'inconvénient qu'offre d'ordinaire la section circulaire pour une bonne compacité des aciers après la coulée.

Le bas et le haut des cylindres sont moulés en sable : il faut, en effet, que les *collets* aient une certaine élasticité pour ne point se rompre sous l'action des vibrations répétées lors de la marche du laminoir. La coquille

correspondant au cylindre lui-même est placée par suite entre deux châssis pour moulage en sable : on l'enduit d'un léger badigeon argileux pour empêcher l'adhérence de la fonte après son refroidissement.

Aussitôt après la coulée, il faut arroser la coquille avec de l'eau contenant de l'argile délayée afin de retarder son échauffement. La dilatation de la coquille tend, en effet, à la séparer de la pellicule consolidée formant la surface du cylindre qui se refroidit et se contracte. Si cette séparation avait lieu trop tôt, cette enveloppe se déchirerait sous la pression de la fonte encore liquide formant le cœur de la pièce.

Nous avons dit plus haut qu'on pouvait ne couler qu'en *coquille mince* enterrée dans le sable quand on ne voulait pas trop durcir la surface, tout en ayant un grain très serré donnant néanmoins une dureté suffisante pour certains usages.

La figure ci-jointe représente le moulage en coquille mince d'un cylindre de laminoir destiné aux premières passes de dégrossissage à chaud alors que le métal encore très plastique s'écoule sans trop d'effort entre deux cylindres qui le laminent. Ces coquilles ont une épaisseur comprise entre 8 à 10 mm. et 1 à 2 cm.

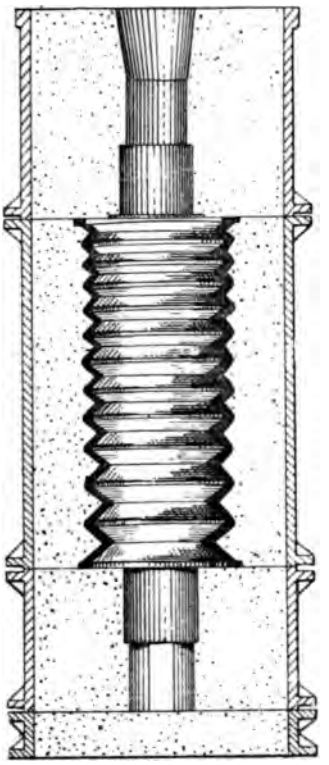


Fig. 42.

Elles sont noyées dans le sable maintenu dans un châssis, ce qui est le cas de la figure, ou simplement placées au milieu du sable d'une fosse.

B. — *Cas d'un voussoir de coupole.* — Le croquis ci-dessous donne une idée de l'installation d'un moule pour voussoir de coupole en fonte dure.

La coulée se fait par le siphon constitué par un moulage en sable afin de s'opposer constamment au refroidissement du jet de coulée.

La surface intérieure du voussoir est également moulée en sable afin que seule la surface extérieure se trouve durcie par la trempe en co-

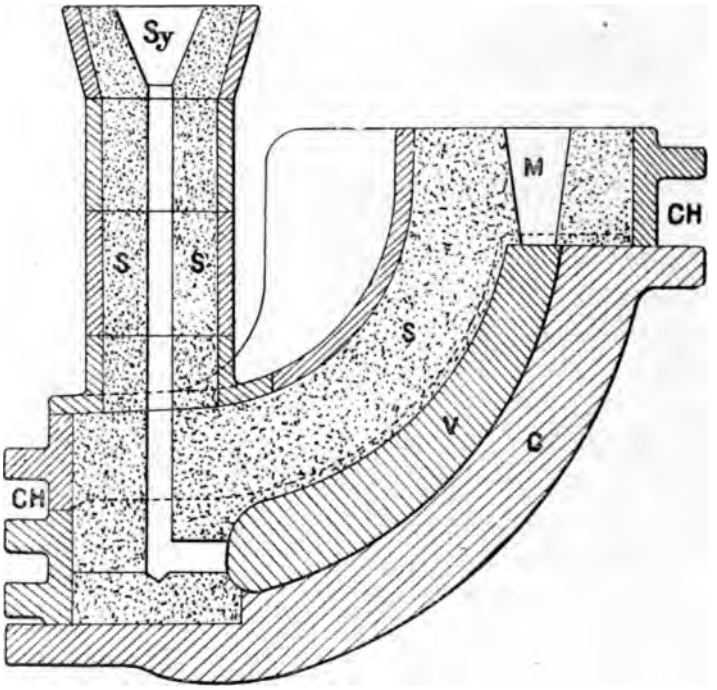


Fig. 43.

V, voussoir. — *C*, coquille en fonte. — *Sy*, siphon — *S*, sable de moulage. — *CH*, châssis. — *M*, masselotte, *ou excédent de fonte.*

quille ; on s'opposera ainsi à une trop grande fragilité et on pourra encore travailler le métal aisément sur une assez grande épaisseur pour l'ajustage.

C. — *Cas des roues.* — La figure ci-dessous indique le dispositif employé pour couler une roue de wagon en fonte trempée. Ces genres de roues doivent être coulées massives, car si l'on coulait entièrement en fonte une *roue à rais* dont la jante doit être trempée, la surface se durcirait moins en face des rais que sur le reste du pourtour.

L'usure serait donc inégale et au bout d'un certain parcours, la jante ne serait plus circulaire.

Les roues de ce genre doivent donc être faites pleines : au lieu de rais, c'est un disque mince qui relie le moyeu à la jante.

La figure 44 montre une coquille enterrée dans le sable et un châssis avec moule en sable pour donner au boudin de la roue une certaine élasticité en diminuant ainsi sa fragilité au choc.

Dans les roues à rais de fer, ceux-ci sont placés à l'avance dans le

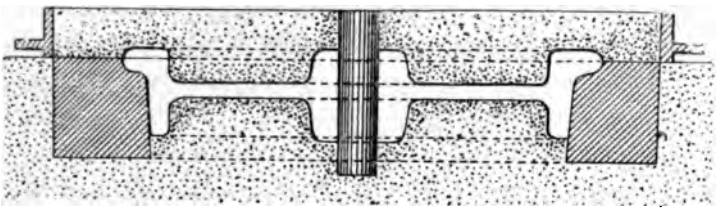


Fig. 44. — Moulage mixte (sable et coquille) d'une roue de wagon.

sable, on coule en coquille la jante d'abord puis le moyeu est coulé en sable : la fonte englobera les extrémités des rais de façon à former un tout solidaire. La jante des roues à rais de fer doit être tenue un peu épaisse, étant d'une part durcie par la coquille et d'autre part blanchie par son contact avec les extrémités des rais de fer qu'elle doit empâter.

D. — *Autres cas.* — On peut enfin introduire dans des moules ordinaires des pièces métalliques pour tremper et durcir une partie de la surface. Ainsi, pour couler une enclume, le moule qui est renversé sera en sable, le fond étant fait d'une plaque de fonte destinée à durcir la surface.

Les moules en sable sont détruits après chaque coulée : aussi pour les pièces dont on doit faire un grand nombre d'exemplaires, on emploie souvent des moules métalliques. Ils se composeront d'enveloppes en fonte, démontables, hérissées à l'intérieur d'aspérités qui servent à appliquer un revêtement en terre. Cet enduit doit être épais de quelques centimètres, pour éviter que la trempe se produise.

Article 4. — De la coulée

La manière dont s'effectue la coulée exerce une grande influence sur la réussite du moulage.

1. — *Coulée proprement dite.*

Sauf exception, on a l'habitude de disposer les jets de coulée dans les régions des pièces les plus massives et les moins délicates.

On coule, *soit à la descente*, *soit en source*.

Dans la coulée *à la descente*, la fonte liquide est introduite à la partie supérieure du moule par un ou plusieurs jets de coulée de manière qu'elle circule très facilement dans toutes ses parties.

Il faut éviter dans ce cas de faire tomber la fonte d'une trop grande hauteur et de donner au métal une direction telle que sa chute ou son passage puissent détériorer les parois, les angles ou les noyaux.

Dans la coulée *en source*, les trous de coulée ménagés tout autour du moule aboutissent à sa partie inférieure et sont reliés à un ou plusieurs siphons garnis intérieurement de terre réfractaire.

La fonte arrive ainsi par le bas et remonte en entraînant toutes les crasses qui se rassemblent dans les *masselottes* dont il sera question plus loin. Quand le moule présente des cavités au milieu de sa hauteur, comme il arrive par exemple pour les tourillons d'un canon, on piquera à l'entrée de ces cavités un petit grillage en fer qui les ferme et qui se dissout dans la fonte quand elle arrive à la partie supérieure, mais qui arrête les scories.

Quelquefois, et lorsque la pièce à couler a une grande hauteur on dispose deux siphons débouchant, l'un à la partie inférieure, l'autre vers le milieu de la pièce, on fait venir la fonte par ce dernier dès qu'elle a atteint le niveau correspondant.

Par ce moyen on fait arriver de la fonte plus chaude vers les régions supérieures du moule en évitant les bulles de gaz ou soufflures qui s'y localiseraient forcément si l'on n'employait qu'un seul siphon.

On fait souvent déboucher la fonte tangentiellement aux parois internes des moules : de cette façon, la fonte prend un mouvement de rotation qui produit une sorte de brassage, facilite le dégagement des gaz et empêche les crasses et les impuretés de rester dans la masse du métal.

Les poches de coulée sont transportées à bras ou sur des chariots, selon leurs dimensions. Pour les grandes pièces, les coulées se font en fosse et des rails permettent d'y amener les poches venant des fours de

fusion (*cubilots ou réverbères*) : on peut aussi les transporter en les suspendant à des grues ou à des ponts roulants.

Les poches sont le plus ordinairement à bascule : les très grandes, difficiles à manœuvrer, sont pourvues d'un trou de coulée inférieur fermé à l'aide d'un bouchon manœuvré par une tige en fer traversant la poche, protégée par un revêtement en terre et appelée *Quenouille*.

Nous verrons à l'étude des poches de fonderie pour acier comment est organisé ce dispositif.

II. — *Des évents.*

Les gaz dissous dans la fonte à la température de fusion s'en échappent lors du refroidissement dans le moule après la coulée.

Il faut favoriser leur départ si l'on veut éviter la formation à l'intérieur de la pièce d'une grande quantité de poches ou soufflures qui compromettraient singulièrement son homogénéité et sa résistance. On a déjà vu que par l'étuvage on facilitait la formation de pores nombreux dans l'intérieur de la matière réfractaire : il est nécessaire de faciliter encore mieux par des évents spéciaux l'évacuation des gaz ou même celle de l'air remplissant le moule et qui sera chassé à la coulée.

Ces évents sont généralement pratiqués à la partie supérieure des moules : on en ménage très facilement en perçant la matière réfractaire au moyen de longues aiguilles en fer. Les gaz qui s'échappent par ces canaux tout préparés sont combustibles et leur vitesse d'écoulement est encore accélérée par ce fait qu'on les allume dès qu'ils commencent à sortir par les évents.

III. — *Des masselottes.*

En général *les trous ou jets de coulée* doivent comprendre une *masselotte* destinée à recevoir un excès de fonte et dont le niveau sera supérieur à celui des points les plus élevés de la pièce. Au travail d'usinage, cette masselotte sera séparée de l'objet moulé.

Le but de la masselotte est :

1° *De recevoir les crasses* qui surnagent sur le liquide et sont ainsi transportées à la partie supérieure.

2° *De combler en partie avec la fonte liquide en excès* les vides qui se forment par suite du retrait général que prend la pièce en se solidi-

fiant et d'augmenter sa compacité par suite de la pression due au métal qu'elle renferme.

Les masselottes correspondront le plus souvent aux parties massives des moules afin que la pression soit plus efficace et qu'elles puissent les nourrir plus aisément.

Les principales difficultés de l'art du maître mouleur consistent à assurer par la forme même du moule l'introduction facile de la fonte dans toutes ses parties et l'évacuation des crasses vers les masselottes.

IV. — *Défauts des pièces coulées.*

Il nous suffira d'appeler l'attention sur les principaux défauts des pièces obtenues par voie de moulage pour montrer combien de difficultés se présentent dans un art pour lequel il n'est pas possible de formuler de règles fixes, puisque les objets à fabriquer sont de formes et de dimensions essentiellement variables.

A. — *Gouttes froides.* — Si la coulée a été *trop rapide*, si le jet a été *interrompu* ou si le métal a été versé d'une hauteur trop *grande*, le moulage contiendra des *gouttes froides*, c'est-à-dire des projections de fonte hors de la portée réelle du jet.

Ces globules de fonte, atteints plus tard par la fonte liquide qui monte dans le moule au fur et à mesure que la coulée s'achève, seront à ce moment en partie solidifiés et ne se relieront que très imparfaitement à la masse même du métal car leur oxydation superficielle constitue un obstacle pour une bonne soudure. Dans les pièces minces, les gouttes froides sont à craindre, car elles peuvent en compromettre la résistance; il en sera de même si elles se trouvent dans des régions à saillies ou à nervures qui devront être plus tard l'objet d'un travail quelconque d'ajustage à froid.

B. — *Reprises, cendrures*, etc. — Les *reprises* proviennent d'une suspension plus ou moins prolongée, quelquefois d'un simple temps d'arrêt de la coulée quand la fonte n'est pas très chaude, ou bien d'une coulée trop lente en fonte froide et peu limpide.

Les *cendrures* qui donnent des surfaces malpropres, des angles inégaux ou arrondis, quand elles ne proviennent pas de la négligence du

mouleur qui a mal lissé ou nettoyé son moule, résultent d'une coulée trop froide ou d'un jet insuffisamment nourri ou trop long.

En général, dans les coulées bien conduites, aucun temps d'arrêt ne doit se produire dans la coulée : on ne pourra cependant pas toujours éviter les *reprises* de fonte car elles proviennent aussi d'une mauvaise circulation de la fonte dans les moules, des jets insuffisants dirigeant la fonte, soit devant de forts noyaux, soit dans des régions de faible épaisseur. La fonte doit aboutir par plusieurs jets dans les parties les plus massives du moule : ces parties remplies ainsi les premières formeront une sorte de bassin d'où la fonte s'échappera avec régularité pour passer par les conduits plus étroits. Si les jets sont trop éloignés les uns des autres, la fonte a un trop grand parcours à faire pour arriver aux extrémités ; dans ce cas elle peut durcir en blanchissant dans les parties minces ou extrêmes.

Quand les reprises entraînent une solution de continuité, elles constituent un défaut dangereux et entraînent le plus souvent le rebut de la pièce.

C. — *Soufflures, piqûres*, etc... — Les *soufflures* sont de petites cavités ou poches situées le plus souvent dans les régions supérieures des moules remplies les dernières ou près des parois. L'air remplissant le moule et les gaz que la fonte laisse échapper en se refroidissant sont chassés par le métal liquide jusqu'aux points culminants où toutes les précautions, pour en favoriser l'échappement, ont pu être incomplètement prises.

De plus, le refroidissement de la fonte peut être assez rapide, soit parce qu'elle n'est pas coulée suffisamment chaude, soit parce que certaines régions du moule sont trop amincies, pour emprisonner les gaz qui, gagnant les surfaces, n'ont pas eu le temps de s'échapper.

Les soufflures résultent non seulement d'une coulée trop froide ou de l'insuffisance du nombre des orifices pour l'échappement des gaz hors des moules et des noyaux, mais aussi de l'excès d'humidité ou d'une mauvaise préparation ou qualité des sables employés.

Généralement, les soufflures sont peu visibles sur les objets qui restent bruts de coulée et ne sont découvertes qu'à la suite du travail d'ajustage.

Comme on ne peut absolument pas les éviter, on s'efforce de diminuer le plus possible leur gravité par une coulée assez chaude, une

bonne préparation des sables, quelquefois même une pression mécanique exercée sur la fonte liquide à la surface des masselottes, etc..... En outre, on dispose les modèles de telle sorte que les parties qui doivent être absolument saines soient placées au fond des moules ; ainsi les plateaux de presse, les marbres à dresser, etc... sont coulés avec la surface à dresser sinon renversée du moins fortement inclinée. Les cylindres sont coulés debout ; souvent même et pour les cylindres de presse notamment, il sera bon de les couler *pleins*, sans noyau : ce sera sans doute plus onéreux mais on aura alors de grandes chances de ne pas rencontrer de soufflures sur la surface intérieure alésée.

Quand les soufflures sont faibles, elles prennent le nom de *piqûres* et sont surtout apparentes après le travail à froid.

Enfin, nous devons simplement énumérer les défauts provenant soit de la *confection vicieuse des moules*, *soit de la forme même des pièces*, etc...

Pour ce qui concerne la forme même des pièces, il est clair qu'en général la fonderie n'a qu'à exécuter la commande qui lui est confiée, mais il appartiendra au constructeur d'étudier la forme des pièces autant en vue des difficultés de fabrication qu'en raison des nécessités de leur emploi s'il désire, soit *payer moins cher*, soit avoir *plus de sécurité*.

Une pièce viendra bien au moulage si les épaisseurs sont aussi égales que possible, si l'on a évité dans sa construction les brusques changements de formes, les parties attachées entre elles à angles trop vifs ou par liaisons trop faibles.

Il y aura lieu de chercher les raccords en formes adoucies ou soutenues par des congés proportionnés, d'employer judicieusement les nervures de consolidation (*qui doivent disparaître à l'ajustage*) et enfin, d'une manière générale, de rechercher la plus grande simplicité de forme et les proportions les mieux balancées.

V. — *Opérations finales.*

Lorsque la fonte s'est solidifiée, on démonte le moule en séparant les châssis ou en le démolissant dans le cas de moulages en terre ou à découvert. Le nombre et la forme des châssis doivent être tels que la masse métallique qu'ils contiennent ne puisse en rien gêner le démontage.

A leur sortie des moules, les objets coulés conservent encore malgré les précautions prises pour aider à leur *dépouille* (couche de plombagine, etc....), des parties de terre ou de sable attachées aux environs des jets surtout et en plusieurs points de leur surface. Il faut opérer le *décroûtage* à l'aide de râpes, couteaux, râcloirs, etc...

On visite ensuite la pièce et l'on ausculte au burin les apparences de criques. On enlève également au burin les bavures, équerres, nervures ou contreforts ayant servi à renforcer les angles vifs dans la confection du moulage, etc...

Cela fait, on livre la pièce au travail d'ajustage, puis aux essais de réception s'il y a lieu.

CHAPITRE III

FABRICATION DE LA FONTE MALLÉABLE

I. — *Définition.*

On désigne sous le nom de *fonte malléable* le produit d'une opération métallurgique spéciale qui consiste à soumettre des objets en fonte fabriqués par moulage, à des recuits plus ou moins prolongés dans des céments *oxydants* de diverses natures, tels que l'oxyde de fer notamment.

Le métal qui, avant ce traitement, était dur, cassant, facilement fusible, devient beaucoup plus doux, malléable, attaquable aux outils et très difficile à fondre.

Le but de cette fabrication dont l'importance tend à décroître de plus en plus (1) depuis que les moulages d'acier, obtenus à presque tous les degrés de douceur, sont devenus d'une pratique courante dans les aciéries, est d'obtenir directement, sans travail à la main ou à la machine, des objets d'assez faibles dimensions mais de formes relativement compliquées dont les frais de forgeage grèveraient beaucoup la fabrication si on les faisait en fer.

(1) Nous devons signaler cependant les nouvelles tentatives en vue de perfectionner cette fabrication, aux Etats-Unis notamment.

On donne ainsi à de petits objets de fonte moulée, et sans changer leur forme, une résistance et une malléabilité comparables à très peu près, à celles du fer.

La fonte **malléable** est employée couramment à la fabrication d'articles très divers pour **la** *serrurerie*, l'*horlogerie*, la *coutellerie*, la *sellerie*, etc., etc..

II. — *Historique* (1)

Il est probable que la fabrication de la fonte malléable est connue depuis longtemps, mais c'est à *Réaumur* qu'on doit les premières recherches scientifiques sur la question.

Le résultat de ces recherches fut exposé dans son ouvrage intitulé « *L'art d'adoucir le fer fondu, ou l'art de faire des ouvrages de fer* « *fondu aussi finis que de fer forgé*, 1722. »

Réaumur décrit dans les six mémoires qui constituent son important travail les procédés de *moulage*, de construction et de disposition des *fours à recuire*, les effets des différents *céments*, etc..... et attribue l'adoucissement de la fonte à l'élimination partielle de ses impuretés, de *ses soufres* et à l'influence des matières absorbantes au milieu desquelles on la chauffe. On sait qu'il considérait l'acier et la fonte elle-même comme résultant de la pénétration *des soufres* du charbon dans les pores du fer.

Le cément auquel *Réaumur* donnait la préférence était le mélange d'os calcinés triturés avec du charbon. Il reconnut aussi que le *Safran de Mars* (peroxyde de fer) produisait un effet très puissant et très rapide.

La fonte malléable était donc pour *Réaumur* une espèce d'acier et l'opération industrielle lui donnant naissance se réduisait à une *cémentation* en sens inverse, soit à une sorte de *décémentation*. On ne saurait mieux dire.

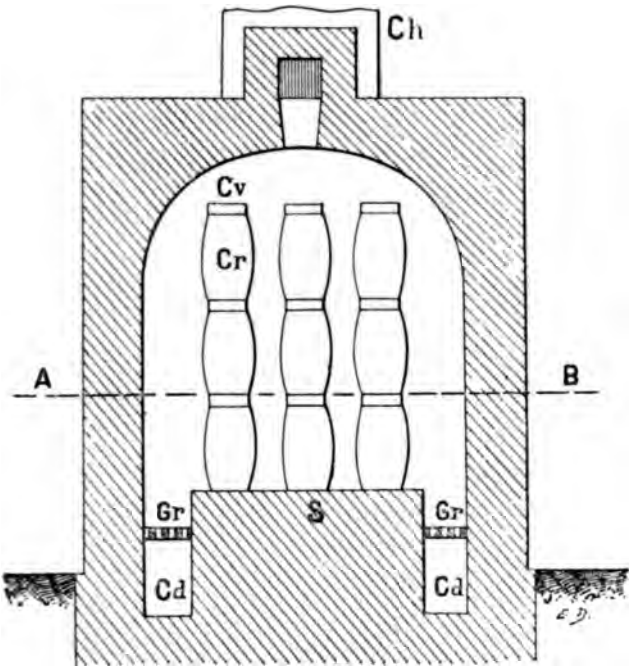
III. — *Pratique de l'opération*

En chauffant la fonte au rouge avec de l'oxyde de fer pulvérulent, on élimine le carbone par une oxydation lente qui se propage peu à

(1) Voir au sujet de la fonte malléable le mémoire de M. Forquignon (*Annales de physique et chimie*).

eu à travers la masse solide. A cette température, le carbone agit sur l'oxyde de fer et se transforme en oxyde de carbone, produit gazeux

Coupe verticale



Coupe suivt AB

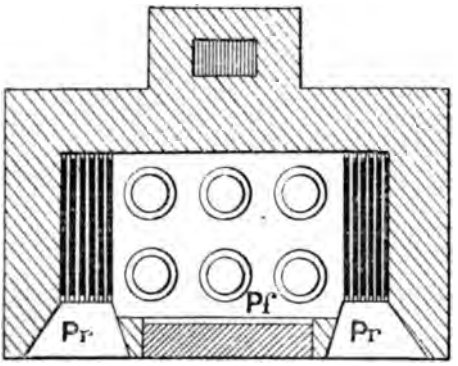


Fig. 45 et 46. — Four pour la fabrication de la fonte malléable.

S, sole. — *ch*, cheminée. — *Cr*, creuset. — *Cr*, couvercle. — *Gr*, grille. — *Cd*, endrier. — *Pr*, porte du foyer. — *Pf*, porte du four.

qui s'élimine. Cette action ne peut se produire qu'au contact et par suite à la surface de la pièce : mais la surface devient poreuse par le départ du carbone et l'oxydation s'étend graduellement aux couches internes. Au delà de 4 à 5 millimètres de la surface, on ne saurait cependant compter sur une décarburation complète ; quand l'épaisseur des objets atteint 5 à 6 centimètres, la région médiane reste en fonte non altérée.

On admet que les fontes destinées à la fabrication de la fonte malléable doivent, en principe, satisfaire aux conditions suivantes :

a) *Être peu carburées* et à carbone combiné plutôt que graphiteux, car il est acquis que le graphite ne s'oxyde pas aisément.

b) *Être exemptes de silicium et de phosphore* ni trop chargées en manganèse, afin que le métal décarburé reste malléable et tenace à froid.

On recherche, en général, des fontes blanches ou truitées fournies par des minerais très purs ; on utilisait exclusivement autrefois les fontes au bois. Le métal initial employé étant très peu fusible, il importe de le couler à haute température, de le démouler très rapidement pour éviter les effets nuisibles d'un trop grand retrait.

L'addition de quelques centièmes de cuivre peut faciliter le moulage et donner une plus belle apparence aux produits.

La fonte, à la sortie du moule, est tellement fragile qu'elle ne peut supporter ni le travail du burin, ni celui de la lime. Il importe donc de ne procéder à l'ébarbage qu'après l'oxydation qui doit la rendre malléable.

Les pièces sont placées dans des creusets fermés en fonte et disposées par lits alternant avec des couches d'hématite rouge broyée en grains.

On peut y mélanger de la chaux, des oxydes de manganèse, etc...

L'oxyde de zinc permet au cément de conserver plus longtemps son efficacité et de resservir à plusieurs opérations.

Les poussières d'appareils à air chaud des hauts-fourneaux constituent un très bon cément.

Souvent on enveloppe les pièces de sable ou on les enduit d'un lait de chaux pour éviter l'adhérence de la surface.

Les creusets bien remplis sont munis de couvercles en fonte lutés soigneusement avec de la terre argileuse et empilés les uns sur les autres dans un four à recuire de dimensions variables selon l'importance des fabrications.

Ces fours sont chauffés au gaz ou à la houille sur grille : le chauf-

fage à la houille sur grille permet de conduire plus aisément l'élévation de la température qui doit être progressive. On chauffe de manière à atteindre le rouge cerise clair (1000° environ) au bout de 24 heures : cette température qu'il ne faut pas dépasser est maintenue pendant trois à cinq jours suivant les dimensions des pièces et le degré de décarburation qu'on veut atteindre, puis on laisse refroidir pendant 24 heures avant de défourner.

On procède alors, s'il y a lieu, à l'ébarbage des pièces les plus fortes et l'on désable ou l'on nettoie les plus petits objets en les roulant au tonneau.

Les pièces peuvent se brûler et présenter à la surface une pellicule oxydée lorsque la température est trop forte ou le cément trop actif ; aussi est-il bon de mélanger à l'hématite du cément ayant déjà servi.

Une bonne formule de cément est la suivante :

Hématite rouge 2/3 Fer oligiste 1/3	Minerai neuf 25 0/0.
Même mélange ayant servi aux opérations précédentes	Minerai vieux 75 0/0.

Quand on veut obtenir une décarburation maxima, il faut employer une quantité de cément constitué comme ci-dessus dans une proportion de 70 0/0 environ du poids de la fonte à oxyder.

Il peut arriver aussi que les pièces se courbent et se déforment sous la charge, si l'empilage dans les creusets n'a pas été fait avec soin.

Si l'adoucissement de la fonte a été insuffisant, ce qu'on reconnaît en se rendant compte de la malléabilité de quelques-unes des pièces du lot, on procède à une nouvelle opération de recuit.

Les objets sont nettoyés et polis en les faisant tourner dans des barils avec du sable ou en les exposant à un jet de sable mis en suspension dans un courant d'air comprimé. La fonte malléable prend un poli plus net, plus brillant et plus franc que celui du fer, se rapprochant de celui de l'acier : mais, aujourd'hui les procédés perfectionnés de nickelage ont remplacé à peu près partout les procédés de polissage employés autrefois.

IV. — *Propriétés de la fonte malléable*

La fonte malléable a une densité un peu inférieure à celle du fer (7,25 en moyenne) ; elle est en effet poreuse et un peu perméable aux liquides, à moins qu'on ne lui donne une épaisseur assez forte, auquel cas le centre n'est pas décarburé.

Elle doit présenter un grain gris clair et brillant, un peu nerveux comme celui de la cassure de l'acier doux ; l'aspect du centre tranche toutefois nettement sur celui de la périphérie.

Les pièces minces et de profils non tourmentés peuvent souvent être tordues et pliées sous des angles assez aigus sans criques ni gerçures : à chaud, elles peuvent être travaillées au rouge cerise sans s'écailler ni se briser.

La fonte malléable se cémente, comme le fer doux, dans des matières charbonneuses et il suffit pour cela d'un temps assez court. Elle acquiert un grain serré et prend assez de dureté quand on la trempe ensuite pour qu'on puisse en faire des ciseaux, des instruments tranchants de toute sorte et même des rasoirs. La plupart des bijoux dits *en acier* sont fabriqués de cette manière.

Conclusion sur le travail de la fonte

L'emploi de la fonte dans les constructions ne s'est pas étendu en proportion du développement industriel : les progrès accomplis dans la préparation économique des pièces de forge en fer ou en acier de formes compliquées ont réduit le nombre des applications autrefois réservées à ce métal.

Comme les résistances sous les divers efforts statiques ou dynamiques se sont considérablement accrues par l'adoption de l'acier, on a pu, pour les moulages faits en ce dernier métal, obtenir des pièces d'un poids bien moindre et offrant cependant une plus grande sécurité.

Néanmoins, la fonte représente encore un élément considérable dans la série des matériaux industriels et pour longtemps encore, *la facilité relative qu'elle présente à la fusion,* ainsi que son *prix bien moins élevé,* lui conserveront une place importante dans les constructions.

L'étude *des propriétés mécaniques* de la fonte et des *méthodes d'essai*

en usage pour les apprécier trouvera sa place lorsque nous traiterons cette question primordiale pour les divers métaux de la métallurgie du fer, sans que l'intérêt qui s'y attache ne soit par trop amoindri. Depuis quelques années, en effet, en raison de la concurrence redoutable résultant de la substitution progressive du fer et de l'acier moulé, les Ingénieurs de fonderie ont dû donner à la fabrication une allure moins empirique. Ils ont recherché les moyens de satisfaire aux conditions imposées par les divers cahiers des charges, soit en pratiquant des mélanges rationnels de fontes, soit en recherchant l'influence de l'introduction de certains corps étrangers sur les propriétés d'une fonte donnée.

TITRE II

INTRODUCTION A L'ÉTUDE DU TRAVAIL DE L'ACIER

LE LINGOT

L'acier obtenu à l'état liquide par un des procédés décrits dans la première partie (*Martin-Siemens*, *Bessemer*, *creuset*) est coulé le plus généralement dans des récipients métalliques donnant, après refroidissement, des blocs plus ou moins compacts appelés *lingots*, de profils et de sections ordinairement fort simples mais éloignés des dimensions définitives que doit avoir l'objet une fois fabriqué.

C'est par des modifications successives de formes, déterminées par un travail à chaud, qu'on amènera le lingot à l'état d'objet brut de forge qu'un usinage ultérieur à froid transformera, après un plus ou moins grand nombre de traitements métallurgiques spéciaux, en objet fini.

Quant au procédé consistant à couler l'acier directement, comme la fonte, dans des moules ayant les formes des objets à obtenir, il sera décrit en temps opportun dans l'étude du travail de l'acier.

Pour le moment, nous ne nous occuperons que des aciers obtenus à la coulée sous forme de lingots. C'est l'étude du lingot, fort complexe du reste, qui fait l'objet des développements qui suivent.

CHAPITRE I

COULÉE EN LINGOTIÈRES

C'est à la coulée que l'on fait commencer, improprement du reste, la métallurgie physique ; le rôle de la métallurgie chimique étant supposé terminé. Sans doute, les réactions chimiques primordiales sont, en gé-

néral, à peu près accomplies dans l'appareil producteur d'acier lorsqu'on va procéder à la coulée, mais il n'est pas exact d'affirmer qu'aucune réaction chimique ne sera plus provoquée lorsqu'on portera le lingot aux températures élevées que réclament ses diverses transformations.

Nous ne saurions, sans sortir des limites d'une étude métallurgique, nous étendre sur la description des engins plus ou moins ingénieux employés dans les fonderies d'acier : notre étude doit se borner au métal, et si incidemment nous donnons des notions sur la construction et le fonctionnement d'un appareil mécanique, c'est qu'il est indispensable de les posséder pour saisir l'effet qu'il exerce sur la matière soumise à son action.

Article 1er. — Procédés de coulée

La coulée est une opération qui consiste à extraire le métal fondu de l'appareil producteur (Martin-Siemens, Bessemer, creuset) et à le verser dans des récipients qui sont, suivant le cas, des lingotières ou des moules.

Ne retenons pour le moment que la coulée en lingotière.

Le métal liquide peut être introduit dans les lingotières par deux procédés, soit *directement*, soit par l'intermédiaire *d'une poche de fonderie*.

Chacun de ces procédés comprend deux variantes : la *coulée à la descente* et la *coulée en source*.

I. — *Coulée directe et coulée en poche*

A. — *Coulée directe.* — Dans la coulée directe il n'y a pas d'appareil intermédiaire entre l'appareil d'élaboration du métal et la lingotière qui le reçoit. On dispose les lingotières sur une plateforme tournante ou sur des rails de manière à les présenter successivement au-dessous de l'orifice de coulée pratiqué sur la face postérieure du four Martin ou devant le bec du convertisseur.

Dans le cas du procédé au creuset, l'ouvrier verse directement le contenu du creuset dans la lingotière en le manœuvrant avec sa tenaille de coulée.

Ce procédé a l'inconvénient d'entraîner avec le métal les scories qui surnagent dans le four et les débris des matériaux réfractaires arrachés aux parois du four ou du conduit de coulée.

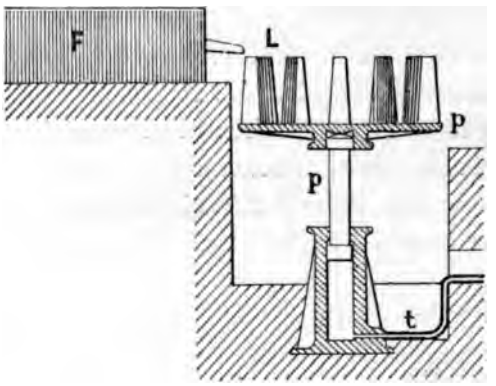


Fig. 47. — Coulée directe.

F, four. — *L*, lingotières. — *P*, plateforme tournante. — *p*, piston. — *t*, tuyau de pression hydraulique.

Le lingot obtenu présente souvent dans ce cas des défauts appelés piqûres.

B. — *Coulée en poche.*— Dans la coulée en poche, le métal est reçu directement à sa sortie du four dans une ou plusieurs poches de fonderie à *quenouille*, puis est versé de la poche dans les lingotières par un orifice pratiqué à sa partie inférieure.

Avant de remplir une poche de métal, on la chauffe au coke ou à l'aide de chalumeaux au gaz d'éclairage pour sécher la garniture et l'empêcher de se désagréger et surtout pour ne pas *trop refroidir le métal* qu'on doit y verser (1).

Par ce procédé, les scories et le sable entraînés surnagent à la surface du bain liquide dans la poche ; on ne débouche le trou de coulée de la poche, en agissant sur la quenouille, qu'au bout d'un temps suffisant pour que cette liquation se soit accomplie.

Ce second mode de coulée s'impose du reste lorsque le métal provient de plusieurs fours.

(1) Des dispositifs électriques qu'il serait trop long de décrire sont aujourd'hui utilisés pour réchauffer les poches de fonderie.

On pourra alors procéder de deux façons :

1°) Ou bien le contenu de chaque four sera coulé dans une poche de fonderie montée sur chariot et amenée ensuite au-dessus de la lingotière.

2°) Ou bien le métal des différents fours sera conduit, par des rigoles revêtues intérieurement de terre réfractaire, dans une poche unique

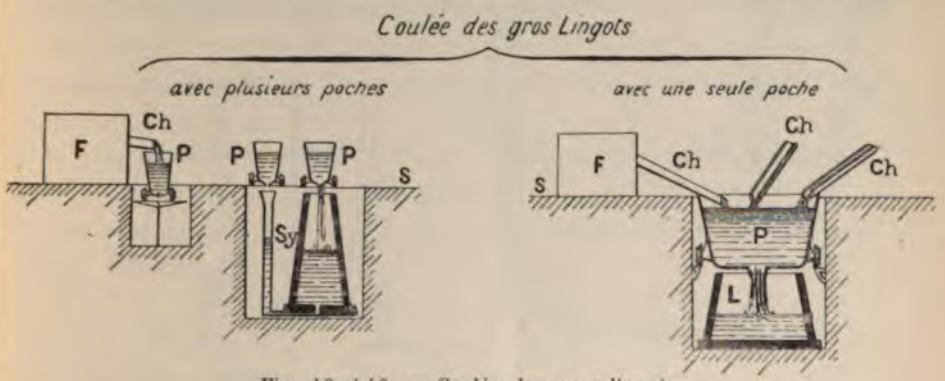


Fig. 48 et 49. — Coulée des gros lingots.
F, four. — *L*, lingotière. — *P*, poche de coulée. — *Sy*, siphon. — *Ch*, chenaux de coulée venant de différents fours. — *S*, sol de l'usine.

qu'on place ensuite au-dessus de la lingotière disposée au fond d'une fosse de coulée très profonde.

Le premier mode, simple, a l'inconvénient de ne produire le mélange du métal des divers fours que dans la lingotière.

Le second mode opère le mélange avant la coulée dans la lingotière et est préférable au premier. Il nécessite, il est vrai, des poches de dimensions considérables occupant une bonne partie de la fosse de coulée dont la profondeur aura dû être augmentée en conséquence.

C. — *Des poches de fonderie.* — La poche de coulée ou de fonderie est en forte tôle garnie intérieurement d'argile réfractaire mélangée de paille hachée qui facilite son adhérence aux parois ou revêtue d'une épaisseur de briques réfractaires.

Cette couche a une épaisseur uniforme de quelques centimètres aux parois verticales, elle augmente vers le coude ou congé reliant ces parois avec le fond et s'incline vers le trou que bouche une brique de forme spéciale appelée *coulée*.

Sur la *coulée* placée sur le fond de la poche, au centre ou plus près de la paroi selon les types de poche, vient prendre appui un tampon

métallique fixé à l'extrémité d'une tige revêtue extérieurement de terre réfractaire.

Cette tige, appelée *quenouille*, est recourbée, se raccorde avec une glissière verticale placée à l'extérieur de la poche et est manœuvrée avec un levier ; quelquefois, la quenouille est verticale et se

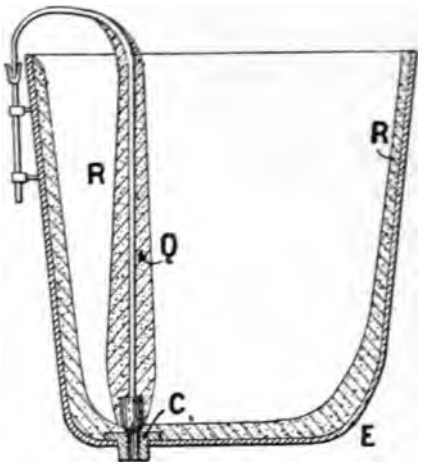


Fig. 50.

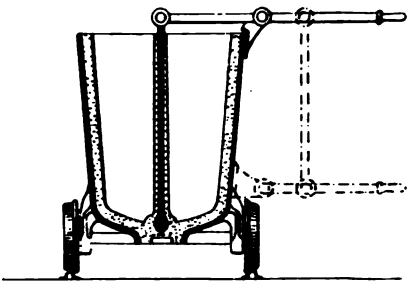


Fig. 51.

R, revêtement réfractaire. — *E*, enveloppe en tôle d'acier. — *C*, coulée. — *Q*, quenouille.

relie directement au levier de manœuvre par une articulation disposée à sa partie supérieure.

Les poches de coulée sont souvent munies d'une anse permettant de

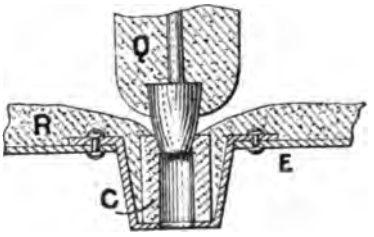


Fig. 52.

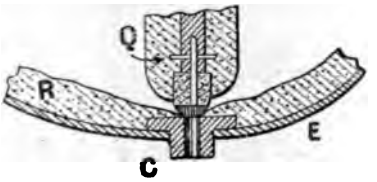


Fig. 53.

R, revêtement réfractaire. — *C*, coulée. — *Q*, quenouille. — *E*, enveloppe en tôle d'acier.

les suspendre au crochet d'une puissante grue qui les amènera au-dessus des lingotières à desservir ; quelquefois, elles sont portées par des chariots auxquels elles sont solidement reliées, elles peuvent, dans ce cas, circuler sur une voie ferrée de manière à venir se placer au-dessus de la lingotière à remplir.

La confection régulière des poches et des quenouilles présente pratiquement une grande importance : si le garnissage n'est pas assez réfractaire ou s'il est mal séché, la tôle se trouve promptement à nu et se perce, en laissant le métal s'écouler souvent d'une façon dangereuse.

D'ailleurs, dans toute coulée, il faut prendre des précautions sévères pour éviter la présence de l'eau, même en petite quantité.

A défaut de ces précautions, on s'exposerait à des projections très dangereuses de métal fondu produites par l'évaporation subite de l'eau et donnant lieu à une véritable explosion.

Si la quenouille n'est pas bien posée, la fermeture n'est pas hermétique, il y a perte de métal en passant d'une lingotière à l'autre.

Quelquefois la quenouille se défait, le bouchon restant collé sur son siège, il faut alors en toute hâte chercher à le soulever en frappant à coup de masse sur une espèce de dégorgeoir figuré ci-contre. Si on ne peut parvenir à déboucher le trou de coulée, il faut se résigner à faire basculer la poche pour continuer la coulée par le bec dont elle est ordinairement munie en versant le contenu dans une *lingotière de secours*. Si la manœuvre n'est pas assez rapide, l'acier trop pâteux peut ne plus s'écouler aisément de la poche et, s'y figeant en masse, forme un *loup* qui n'est plus utilisable.

Fig. 54. — Dégorgeoir.

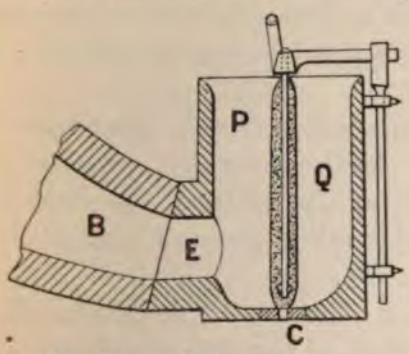


Fig. 55. — Poche-convertisseur *(de Caspersson)*

B, bec de la cornue Bessemer. — *E*, entrée de la poche. — *P*, poche de coulée. *Q*, quenouille. — *C*, coulée.

Les poches ont des contenances très variables selon le tonnage des fours de l'usine et la puissance de ses appareils de transformation. Les poches de 10, 15, 25, 30 tonnes se rencontrent souvent dans les aciéries, quelques-unes atteignent dans les grandes installations une contenance de 100 tonnes.

Nous signalerons enfin la *poche convertisseur de Caspersson* employée pour le Bessemer afin de diminuer la perte de chaleur et la formation des scraps qui en résulte

quand on coule de petites charges d'acier doux de la cornue dans une poche de coulée ordinaire (Voir métallurgie de *Howe*, édition française, page 445).

Cette poche convertisseur est attachée à l'aide de clavettes au bec de la cornue renversée pour la coulée.

La cornue Bessemer est inclinée de façon à ne faire passer dans la poche convertisseur qu'une faible fraction du métal qu'elle contient, celui-ci restant en grande partie en arrière dans la cornue qui est chaude et ne coule que graduellement dans la poche en y séjournant à peine avant de passer à la lingotière. Les lingotières se trouvent sur une table tournante qui les amène successivement sous le trou de coulée de la poche.

II. — *Coulée à la descente et coulée en source.*

Suivant que le métal est versé dans la lingotière par la partie supérieure de celle-ci ou qu'il y arrive par siphon vertical extérieur débouchant à la partie inférieure, la coulée est dite à la *descente* ou *en source*.

A. — *Coulée à la descente.*— Dans ce procédé, l'acier introduit par le haut de la lingotière tombe sur la plaque de fond qui obture, comme on le verra plus loin, son ouverture inférieure.

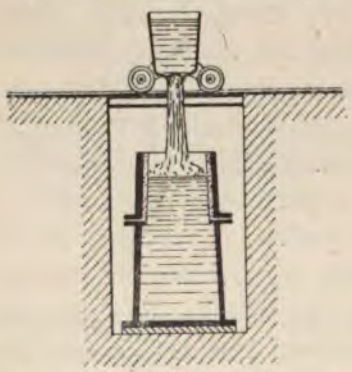


Fig. 56. — Coulée à la descente.

La coulée à la descente a pour avantage de demander une installation simple et doit toujours être préférée pour les petits lingots ou de dimensions moyennes.

Si la lingotière est de grandes dimensions, il peut être dangereux de laisser tomber d'une grande hauteur sur la plaque de fond un liquide aussi dense que l'acier.

Au delà de 4 mètres, on risque de briser la plaque de fond ou de la percer en répandant ainsi le liquide dans la fosse de coulée, ce qui peut provoquer de graves accidents. Comme palliatif, et quand les dimen-

sions des lingotières ne sont cependant pas trop fortes, on protège quelquefois le fond de la lingotière par une plaque de tôle qui, après refroidissement, reste adhérente à la partie inférieure du lingot et disparaît avec le déchet du métal auquel on consent toujours en sacrifiant dans le cours de la fabrication le *pied du lingot*. Si l'on imprime à la poche, dès le début de la coulée, un léger mouvement de balancement, le jet initial du métal ne percera pas cette tôle qui pourra ainsi remplir son rôle de protection.

Enfin, si le liquide tombe d'une trop grande hauteur dans la lingotière, il rejaillit vers les parois en gouttelettes qui se refroidissent rapidement, s'oxydent à la surface et retombent dans la masse. Or, ces globules oxydés ne se soudent point au reste du métal et forment ce qu'on nomme des *gouttes froides* se trouvant toujours très près de la surface extérieure.

B. — *Coulée en source.*— Dans ce cas, un siphon garni de terre réfractaire est adapté au bas de la lingotière et y amène le métal liquide qu'on coule par le haut du siphon.

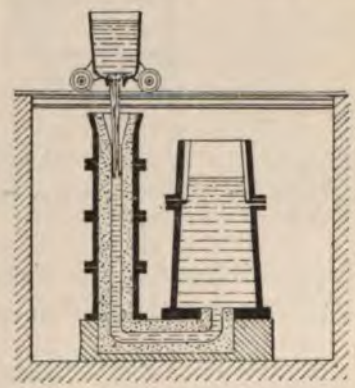


Fig. 57. — Coulée en source.

C'est surtout pour les lingotières élevées qu'on emploie la coulée en source qui évite le danger de rupture de la plaque de fond et le défaut des gouttes froides.

Malgré ces avantages, ce procédé n'est pas exempt de critiques.

Il a le défaut d'arracher parfois des morceaux de la garniture réfractaire du siphon et de les entraîner dans le lingot.

En outre, le métal étant introduit par le bas, c'est l'extrémité inférieure du lingot qui se trouve la plus chaude lorsque la coulée est terminée.

Nous verrons plus loin l'inconvénient qui peut en résulter.

Comme la coulée en source ne peut se faire qu'en poche (*à cause de l'ouverture étroite du siphon*), on peut, pour éviter les inconvénients du refroidissement du métal au cours de la coulée, combiner pour la coulée des gros lingots les deux modes de coulée à la descente et en source. On commence alors par couler en source la partie inférieure du

lingot, puis on termine en coulant avec deux poches à la fois, l'une en source et l'autre directement à la descente.

La coulée en source exige une installation plus compliquée : en définitive, quoique préférable à première vue, ce mode de coulée d'une application délicate ne s'est pas trop vulgarisé dans les aciéries.

En résumé, quelle que soit la méthode employée, il est une règle à

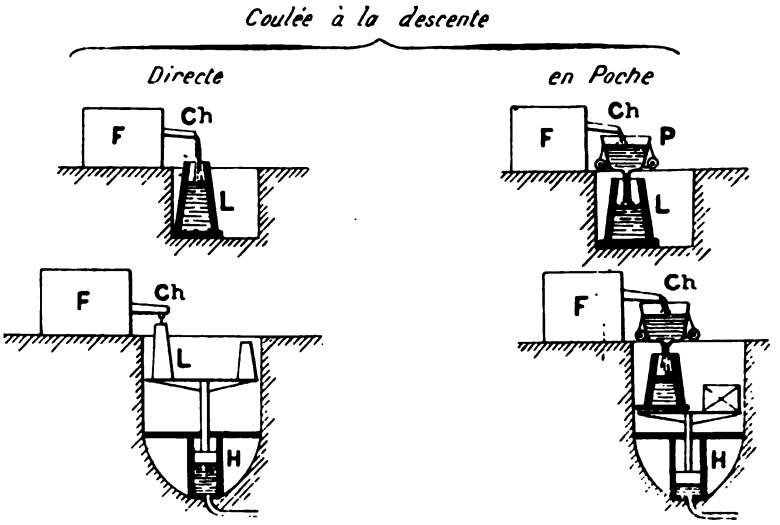


Fig. 58 et 59. — Coulée à la descente.

F, four. — *P*, poche de coulée. — *L*, lingotière. — *H*, appareil hydraulique de soulèvement. — *Ch*, chenal de coulée.

laquelle il faut toujours s'assujettir. Le jet de coulée ne doit pas être interrompu pendant qu'on coule et si la lingotière est d'un volume tel

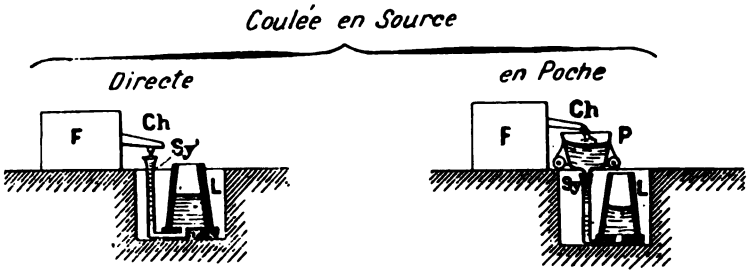


Fig. 60 et 61. — Coulée en source.

F, four. — *Ch*, chenal de coulée. — *Sy*, siphon. — *L*, lingotière. — *P*, poche de coulée.

qu'elle demande le contenu de plusieurs poches, on ne doit pas attendre qu'une poche soit vidée complètement pour ouvrir la suivante.

Nous verrons ultérieurement combien il importe que la coulée soit effectuée à température convenable.

Article 2. — Les lingotières

On désigne sous le nom de *lingotières* des récipients en fonte, de forme ordinairement simple, dans lesquels on verse l'acier liquide pour l'y laisser prendre corps, sans attendre toutefois sa solidification complète.

Le bloc d'acier ainsi obtenu prend le nom de *lingot*.

Les lingotières doivent être en fonte grise à grains serrés, de bonne qualité. L'épaisseur de leur paroi est variable ; elle est généralement comprise entre 5 et 15 centimètres selon les dimensions des lingots qu'elles doivent fournir.

I. — *Formes des lingotières*

La forme la plus ordinaire des lingotières est celle d'un tronc de pyramide à section carrée, rectangulaire ou polygonale, ouvert à ses deux extrémités.

La forme en tronc de pyramide n'a pas d'autre but que de faciliter l'extraction du lingot après un temps variable suivant sa dimension.

Pour un lingot de poids donné, la hauteur de la lingotière ne doit pas être trop faible, sinon la section deviendrait trop grande, et il faudrait réduire beaucoup le lingot dans le sens transversal quand on procéderait au forgeage.

La grande base repose sur une *plaque de fond* en fonte assez épaisse sur laquelle vient frapper le jet liquide dès les premiers instants de la coulée à la descente.

On peut, comme il a été dit plus haut, la protéger par une tôle ou, mieux encore, par une large brique réfractaire qui résiste fort bien à l'usure.

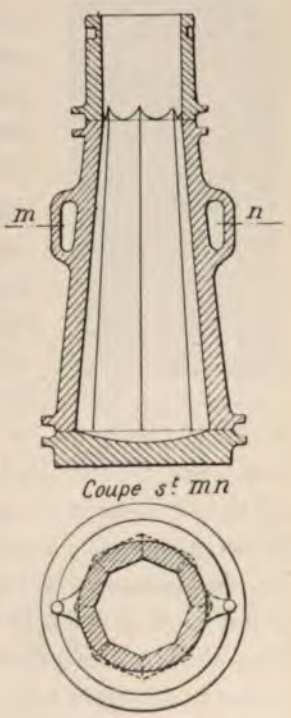


Fig. 62.

Dans quelques usines, on reçoit le métal dans une sorte d'entonnoir intermédiaire garni de terre réfractaire et percé d'un ou de plusieurs trous de

coulée. On brise ainsi la violence du jet venant directement du four ou de la poche de fonderie et comme l'acier remplit plus tranquillement la lingotière, l'homogénéité du lingot est mieux assurée.

A. — *Discussion de la forme de la section.* — La *section carrée* est surtout employée pour les petits lingots ou de dimensions moyennes, elle présente toutefois l'inconvénient de rendre le forgeage moins régulier; le corroyage, c'est-à-dire la diminution des dimensions transversales, étant sensiblement plus fort vers les angles que vers le milieu de la section.

Avec la *section hexagonale* il est difficile de forger alternativement dans des plans rectangulaires, condition nécessaire pour donner à la pièce une section régulière; aussi la *section octogonale* est-elle le plus souvent employée pour les grosses pièces de forge.

La *section rectangulaire* est adoptée pour les lingots destinés à fournir par pilonnage, laminage, etc... des plaques de blindage et des tôles : les petits côtés du rectangle ont toutefois une légère courbure. Pour les gros lingots destinés à fournir des plaques de blindage il est essentiel de ménager une masselotte d'après les dispositifs qui seront décrits plus loin pour les lingots ordinaires.

Fig. 63.

Les lingotières à *section circulaire et tronconique* étaient autrefois d'un usage rare dans les usines françaises; elles ont commencé cependant à s'y répandre depuis la fabrication des bandages de roue sans soudure et celle des obus de rupture en acier très dur. Il convient d'ajouter que l'inconvénient de leur emploi, signalé plus loin, est notablement amoindri de par la nuance même de l'acier à point de fusion relativement peu élevé qu'on y coule, le refroidissement de cet acier s'effectuant de ce fait dans de meilleures conditions. On économise ainsi la main-d'œuvre en rapprochant la forme du lingot de celle que devra avoir la pièce achevée et l'on rend en même temps le forgeage plus facile.

Fig. 64.

Dans ces derniers temps, avec les progrès réalisés dans la fabrication

d'aciers jouissant de propriétés remarquables d'allongement et de résistance et depuis l'emploi plus fréquent de forgeages spéciaux *(sur mandrin notamment)*, on n'a pas craint dans certaines usines de recourir aux lingotières à section circulaire.

Il y a cependant, en procédant ainsi et avec certains aciers, un certain risque d'avoir sur la peau du lingot quelques déchirures généralement peu profondes, appelées *criques*.

Supposons, en effet, une lingotière à section circulaire ; le métal qui y est coulé se refroidit au contact des parois et il se forme *plus ou moins rapidement*, autour du métal en fusion, une croûte mince. Le retrait général commence, la croûte du lingot se détache de la lingotière et supporte alors la pression du métal liquide qu'elle contient et qui tend à agrandir son périmètre.

Le cercle étant la figure qui, pour une surface donnée, offre le périmètre minimum, il en résulte dans le cas actuel que la croûte du lingot ne pouvant s'agrandir en se déformant, cède et se fend en produisant une crique C (fig. 64).

Pour diminuer les chances de criques longitudinales il faut donc recourir à des lingotières dont la section horizontale soit telle que la croûte puisse se gonfler sans déchirures.

A cet effet, on a adopté des sections carrées ou polygonales dont les côtés sont légèrement convexes vers l'intérieur. On obtient ainsi un meilleur retrait pour le métal et des lingots à faces mieux dressées et plus sains. De plus, on a soin d'opérer la coulée aussi lentement que le permet la fluidité du métal.

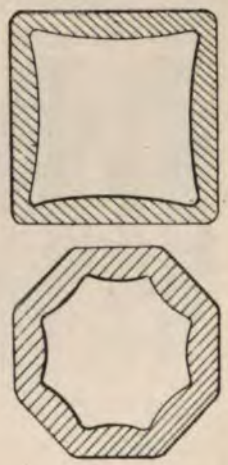


Fig. 65.

La coulée en source tend aussi à favoriser la formation des criques longitudinales ; il est nécessaire, en effet, que le métal soit coulé très chaud puisqu'il arrive par un siphon de faible section dont il faut éviter l'obstruction et qu'il doit remonter ensuite à travers l'acier qui a déjà rempli en partie la lingotière. Le métal étant coulé très chaud, les couches extérieures sont solidifiées tandis que le cœur est encore à une température très supérieure au point de fusion de l'acier. Si, d'autre part, on coule le métal à une température insuffisante il peut se former avant la fin de la coulée une croûte à la partie supérieure du métal ; alors le métal

166353

liquide sous-jacent, pressant sur cette croûte, peut la percer et passer par dessus en englobant ainsi à l'intérieur du lingot une couche de métal mal soudée.

Après le démoulage ces criques sont sondées, puis burinées avant tout travail de transformation du lingot, de façon à en raccorder le fond avec le reste de la surface par des angles peu aigus. Si on laissait ces criques, le forgeage ne les ferait pas disparaître, car les lèvres de ces déchirures sont oxydées et ne peuvent plus se souder ; elles constituent, en outre, des amorces de fentes qui peuvent devenir plus profondes et compromettre la solidité de la pièce.

On peut craindre encore des *criques transversales* dues à l'adhérence de certains points de la croûte au moment où les points voisins se détachent de la lingotière. On évite ce genre de défauts en employant des lingotières franchement évasées vers le bas.

B. — *Types divers de lingotières.* — On a vu plus haut que, pour faciliter le démoulage du lingot, le corps de la lingotière était pyramidal. Certaines usines arrivent à démouler rapidement par l'emploi de *lingotières en deux parties* s'emboîtant l'une dans l'autre ou prenant appui par une feuillure et maintenues par deux frettes en fer.

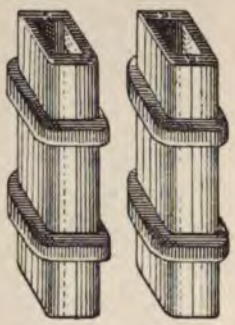


Fig. 66.

Ces lingotières démontables ne sont commodes que pour des lingots d'un poids assez petit, sinon elles exigent pour leur manœuvre un outillage très complexe. Elles ont l'inconvénient de donner des lingots présentant deux bavures longitudinales en face des joints des deux portions de lingotière, bavures qu'il importe de buriner avec soin avant de procéder à tout travail de transformation à chaud.

On rencontre quelquefois des *lingotières ouvertes seulement à leur partie supérieure*, le fond étant venu de fonte avec les parois et de forme pyramidale ordinaire. Ces lingotières dites « *borgnes* » présentent sur celles percées de part en part l'avantage d'éviter les bavures à la partie inférieure : le lingot est plus propre et ne présente pas les petites retirures qui se trouvent toujours dans le voisinage des bavures. Cependant la détérioration du fond sous l'action du jet d'acier est assez fréquente et dans ce cas, si le fond est percé, il faut rebuter la lingotière.

Les lingotières à obus de rupture en acier chromé sont presque toujours *borgnes* pour bénéficier des avantages énumérés plus haut. On y trouve, en outre, l'avantage d'obtenir un lingot dont la forme brute est à peu près semblable à celle du projectile fini de forge. Et comme la partie inférieure du lingot est généralement plus saine que la partie supérieure, ainsi qu'on le verra plus loin, on aura pour l'ogive un métal de qualité supérieure, chose essentielle pour un projectile destiné à percer les plaques.

Fig. 67.

Fig. 68.

Pour garantir le fond de ces lingotières, le métal est versé d'ordinaire par un entonnoir intermédiaire à plusieurs trous pouvant recevoir un mouvement vertical de translation.

Le jet multiple initial réglé à bonne hauteur au début de la coulée reste à hauteur égale jusqu'à la fin, si l'on a soin de relever l'entonnoir au fur et à mesure que la coulée s'accomplit. Le mouvement de giration provenant d'un jet unique tombant suivant l'axe de la lingotière est en outre supprimé ; car, le métal tombant par trois ou quatre jets, le niveau s'élève tranquillement dans la lingotière par sections à peu près parallèles.

Pour les *lingots de même hauteur* à fabriquer en quantités importantes et régulières (*fabrication de rails*, *aciers de construction*, etc...) on peut faire usage de lingotières *borgnes renversées* et coulées en source. On arrête la coulée lorsque le métal apparaît à 15 ou 20 cm. environ de l'orifice ménagé dans le fond de la lingotière. On bénéficie ainsi des avantages inhérents à la coulée en source : pas de gouttes froides ni de rupture ou de déformation de lingotières par chauffage inégal. Les lingotières sont, de plus, toujours complètement remplies même avec les aciers qui bouillonnent et remontent beaucoup.

Fig. 69. — Lingotière borgne renversée.

Quand le métal a tendance à rocher, c'est-à-dire quand il remonte, on l'arrête en jetant du sable fin au-dessus de sa surface et au besoin à l'aide d'une plaque en tôle clavetée par-dessus ou d'un fort tampon en fonte. On peut enfin, pour faciliter le dégagement gazeux, crever à

plusieurs reprises avec un morceau de bois ou un petit ringard la croûte qui se forme au-dessus du lingot.

Toutes les lingotières communiquent entre elles au moyen d'une conduite en argile réfractaire placée à la base. Les jets de métal réunissant les lingots par la base sont souvent détachés au moyen d'une presse hydraulique déplaçant latéralement toutes les lingotières au moment où l'acier se solidifie, en produisant un véritable cisaillement.

On trouve quelquefois des lingotières dont la *conicité* est dirigée de bas en haut; cette disposition assez rare a été imaginée afin qu'au laminage la partie supérieure du lingot soit le plus serrée au grand profit du métal toujours inférieur en qualité dans cette région.

Fig. 70.

Fig. 71.

Nous signalerons enfin les lingotières pour bandages de formes tout à fait caractéristiques fournissant des lingots dont les figures 70 et 71 représentent les types principaux.

Ces lingots, appelés souvent *bonbonnes*, ont un faible creux de retrait à leur partie supérieure, car leur refroidissement est assez rapide ; la nuance de l'acier dont ils sont constitués étant assez dure. Ils sont destinés à être poinçonnés à chaud suivant l'axe.

II. — *Manœuvre des lingotières*

Les lingotières sont munies le plus souvent de deux anses ou oreilles que saisissent les crochets d'une grue pour les transporter du sol de l'usine dans la fosse de coulée et réciproquement. Pour le démoulage, il suffit de les soulever par les oreilles, le lingot se détache de lui-même et reste debout sur sa base ; on l'enlève alors à l'aide de pinces appropriées.

Lorsque la surface interne de la lingotière est un peu rugueuse le lingot reste adhérent, est enlevé avec elle, et il faut frapper la lingotière de vigoureux coups de masse pour l'en faire tomber. Quelquefois, lorsque le métal est très chaud, l'adhérence est telle qu'il faut recourir à de véritables manœuvres de force pour expulser le lingot.

On cherche à combattre cette adhérence en enduisant les lingotières de goudron, de noir de fumée délayé dans de l'huile, d'eau de chaux,

etc... ; dans quelques usines on les refroidit par une lance d'eau dès la fin de la coulée.

Le métal est démoulé quand il a une température de 300 à 600°. A leur sortie de la lingotière les lingots peuvent être abandonnés à l'air libre jusqu'à complet refroidissement.

Les usines américaines font un grand usage d'un extracteur à lingot spécial « *ingot stripper* » consistant en une presse hydraulique horizontale dont le piston exerce une forte pression sur le lingot. La figure ci-dessous représente le dispositif employé.

La durée des lingotières est variable suivant que l'on coule directement ou en source ; en général, une bonne lingotière doit faire 80 à 100 coulées en moyenne.

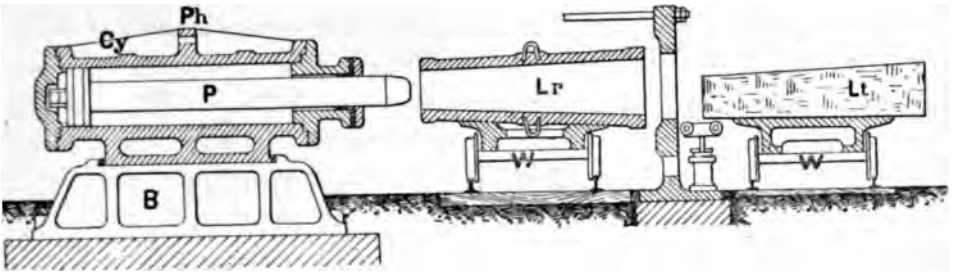


Fig. 72. — Extracteur pour lingots.

Cy, cylindre. — *P*, piston. — *Ph*, presse hydraulique. — *Lr*, lingotière. — *W*, wagonnet spécial. — *Lt*, lingot démoulé. — *B*, bâti de la presse.

On a cherché à prolonger leur durée en utilisant des lingotières fabriquées avec un mélange de fonte et 10 0/0 d'acier ; si un pareil mélange ne se fait pas dans de bonnes conditions, on arrive à une rupture plus rapide que si l'on avait pris exclusivement de la bonne fonte.

CHAPITRE II

LE LINGOT N'EST PAS HOMOGÈNE

Il semble, de prime abord, qu'un métal fondu doive être absolument régulier dans toute sa masse : partant de cette idée non soumise au début à un contrôle expérimental suffisamment sévère, les premiers

producteurs d'acier fondu en grande masse désignèrent ce métal sous le nom de *métal homogène.*

L'expérience ne tarda pas à convaincre les Ingénieurs métallurgistes qu'une pareille dénomination ne pouvait être justifiée. On dut reconnaître qu'un lingot d'acier n'est comparable d'un point à un autre, *ni au point de vue chimique, ni au point de vue physique.*

Article 1er. — Etude chimique du lingot (1).

Le métal liquide, sortant du four, ou mieux encore de la poche de coulée, peut être considéré comme un liquide homogène, mais dès qu'il est coulé en masses un peu grandes dans les lingotières il met un temps assez long pour passer de l'état liquide à l'état solide.

Or, pendant ce temps, des phénomènes *de liquation* d'autant plus importants que le lingot est de plus fort tonnage auront pu se produire, puisqu'on sait que l'acier n'est autre chose que du fer contenant certains métalloïdes et métaux.

I. — *Historique de la question*

Les phénomènes de liquation ont été observés depuis longtemps déjà, dès que les aciers *Bessemer* et *Martin-Siemens* se furent vulgarisés, mais leur étude rationnelle est relativement récente. Ce sont les *Anglais* et les *Américains* qui ont publié les premiers résultats sur les phénomènes spéciaux auxquels ils ont donné le nom de *segrégation.*

D'après *Tchernoff* (*métallurgiste russe dont les travaux seront étudiés plus loin*), le manque d'homogénéité des lingots d'acier *Bessemer* surtout coulés dans des moules en sable aurait été signalé, en 1866, pour la première fois.

En 1868, on constata aux usines de *Terrenoire* (Loire) sur des lingots d'acier pour rails venant de l'aciérie de MM. *Pierre* et *Emile Martin* de *Sireuil* (Charente) que, dès les premières passes du laminage, une tranche assez importante du métal se séparait de la tête de chaque lingot.

(1) Consulter à ce sujet, dans les Rapports de la commission des méthodes d'essais, les mémoires de MM. *Brustlein* et *Pourcel* largement mis à contribution dans cette étude.

Pour obvier en partie à cet inconvénient, ces usines adoptèrent, dès 1870, le dispositif de coulée en lingotières avec *masselotte;* il en sera question ultérieurement à propos de l'étude générale sur les défauts physiques des lingots. Ajoutons toutefois que ce procédé ne constituait qu'un palliatif et que la liquation ne pouvait être supprimée de ce fait.

Un accident arrivé aux chaudières du « *Livadia* » provoqua des discussions très vives en *Angleterre* sur les causes des défauts d'homogénéité des tôles d'acier.

Au meeting de l'*Iron and Steel Institute* du printemps de 1881, M. *Stubbs*, de *Manchester*, donna enfin des chiffres en mentionnant les résultats hétérogènes d'analyses faites sur différentes parties d'un lingot de forte section. Depuis cette époque, cette question a été l'objet de nombreuses expériences.

II. — *Mécanisme de la segrégation*

Voici, d'après M. *Brustlein*, comment s'effectue, selon toute apparence, ce phénomène de *segrégation* :

« L'acier fondu versé dans la lingotière met un temps appréciable « à passer de l'état liquide à l'état solide. Dans ces conditions, les « parties qui se figent immédiatement contre le fond et les parois « de la lingotière ou par rayonnement tout au haut du lingot ont bien « la composition moyenne du métal liquide; mais par suite du retrait « du restant du métal liquide, il tend à se former vers le milieu du lin- « got un vide et pendant le refroidissement lent de la masse intérieure, « il se fait vers le centre un départ de métal plus chargé en métalloïdes « que la moyenne. Ce métal liquaté, parce que sa température de fusion « est plus basse, vient se rassembler vers le milieu dans les interstices « laissés libres par le retrait. De sorte que le dernier métal figé diffère « souvent, beaucoup par sa composition chimique et ses propriétés « physiques, de la nature moyenne de l'acier du lingot.

« En outre, cette partie centrale se figeant dans l'enveloppe rigide « formée par les parois extérieures du lingot, ne peut effectuer complè- « tement son retrait, et pour ce motif reste poreuse et souvent à un état « de tension dangereuse.

« De sorte qu'en représentant dans la coupe longitudinale par l'axe « du lingot les couches de plus en plus foncées, la répartition des du-

« retés peut être représentée, d'une façon générale, par le dessin ci-
« dessous : coupe théorique dans laquelle on a nettement divisé les
« couches successives, pour la clarté des explications.

« La couche 2 représente la composition moyenne du lingot ; la « couche 1, qui a cédé des métalloïdes à la « partie centrale, est moins dure que la compo- « sition moyenne.

« Puis les duretés vont en augmentant, ainsi « que l'indiquent les chiffres croissant vers le « centre, tandis que les allongements diminuent. « — *Brustlein.* »

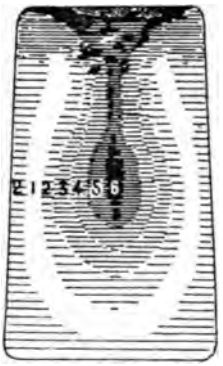


Fig. 73.

La moyenne d'un grand nombre d'observations a démontré que l'ordre de segrégation est à peu près le suivant : carbone et phosphore, soufre, silicium et manganèse. L'expérience montre aussi qu'il est difficile d'obtenir des aciers homogènes chimiquement lorsqu'ils contiennent du chrome et du tungstène : les aciers au nickel, et surtout ceux qui en contiennent une forte proportion, sont remarquables par leur homogénéité.

Nous reviendrons ultérieurement sur cette question à propos de ces aciers spéciaux.

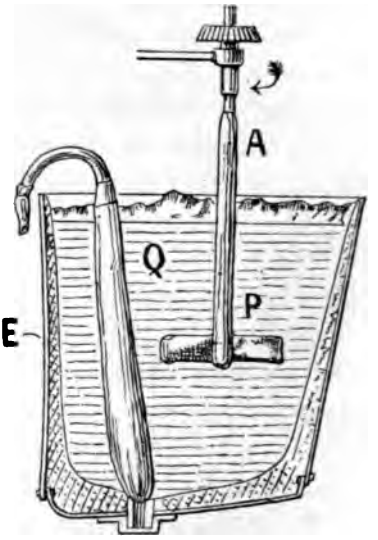


Fig. 74. — Agitateur Allen.
A, arbre. — *Q*, quenouille. — *E*, enveloppe en tôle d'acier. — *P*, palettes.

Ainsi qu'on l'a dit plus haut, et l'expérience le confirme, on peut admettre l'homogénéité du métal dans la poche de coulée. Il a été constaté bien des fois que le métal sorti le premier de la poche de coulée ne diffère pas sensiblement de celui qui en sort le dernier. Aussi tous les dispositifs spéciaux essayés successivement dans les usines pour réaliser dans la poche de coulée une homogénéité plus parfaite, ont-ils été successivement tous abandonnés. L'inconvénient grave qui en résultait était le refroidissement considérable que subissait l'acier avant d'être

versé dans les lingotières. Nous citerons pour mémoire l'agitateur *Allen:* la poche de fonderie contenant l'acier liquide était amenée par une grue de coulée sous des palettes en hélice montées sur un arbre vertical; on élevait ensuite la poche pour y plonger l'agitateur.

Les palettes et leur arbre sont recouverts en terre-réfractaire.

III. — *Résultats d'expériences*

Nous trouvons, dans un mémoire de M. *Pourcel*, les résultats d'expériences suivants :

a) Au meeting de 1881 de l'*Iron and steel Institute*, *M. Stubbs* avait cité des chiffres. Une prise d'essai faite à 0m60 environ de la tête d'un lingot de 2m30 avait donné à l'analyse des résultats très différents de ceux d'une prise d'essai faite à 0m75 du fond :

	C	Mn	Si	S	Ph
Haut du lingot . . .	0,92	0,536	0,043	0,161	0,261
Bas du lingot. . . .	0,37	0,498	0,006	0,025	0,096

M. *Windsor Richards* signala qu'il avait souvent constaté sur des prises d'essai faites en différents points d'une tôle des écarts en carbone de $\frac{5}{10000}$

b) Au meeting de 1888, M. *Herbert Eccles* signala la non-homogénéité des tôles en acier doux fondu mise en évidence, soit par les essais mécaniques auxquels on soumit des échantillons découpés dans des régions déterminées, soit par l'analyse chimique.

Voici les analyses de la partie centrale et de la partie extérieure d'une tôle en acier :

	C	S	Ph	Mn
Partie centrale . .	0,24	0,155	0,127	0,614
Partie extérieure. .	0,15	0,054	0,060	0,648

Les analyses que l'on fit sur les tôles des chaudières éclatées du *Livadia* donnèrent pour des échantillons pris sur la même tôle des écarts assez sensibles, comme le montrent les chiffres suivants :

C : 0,095 et 0,200 — Ph : 0,039 et 0,095
S : 0,036 et 0,177 — Mn : 0,031 et 0,371.

On voit donc combien il est important d'examiner de près la qualité des tôles, soit pour la sécurité que réclame l'emploi des chaudières, soit pour la résistance des emboutis nombreux fabriqués aujourd'hui en partant d'un disque découpé dans une tôle d'acier, doux ou dur, selon les résistances demandées.

c) Le *Stahl und Eisen* d'Août 1891 contient les analyses exécutées sur des prises d'essai faites en différentes parties d'un cylindre de laminoir de 7 tonnes, coulé en acier *Bessemer*. Sa forme en tronc de cône reposant sur sa grande base avait déterminé en dernier lieu la solidification de la partie inférieure, la *coulée s'étant faite en source*.

Le métal mère, c'est-à-dire celui contenu dans la poche de coulée, avait la composition suivante :

La prise faite dans le tourillon supérieur, qui s'était solidifié en premier lieu, donnait à l'analyse :

C	Si	Mn
0,215	0,338	0,910

On trouvait moins de carbone et à peu près les mêmes quantités de manganèse et de silicium, les écarts entre ces deux derniers nombres et ceux précédemment trouvés pouvant être attribués aux erreurs d'analyse.

Le métal du tourillon inférieur était plus dur que le métal mère ; il donnait à l'analyse :

C	Si	Mn
0,314	0,280	0,980

Quant au métal solidifié le dernier et qui constitue les parois du vide

existant à la partie supérieure de presque tous les métaux coulés (retassure, entonnoir de retassement, etc...), sa composition ne rappelait plus celle du métal mère comme le montrent les dosages suivants :

C	Si	S	Ph	Mn
0,680	0,326	0,325	0,318	1,490

C'est là, ajoute M. *Pourcel*, un exemple des plus curieux qui ait été donné du phénomène de liquation pour un métal relativement doux et pur.

d) Dans des lingots de moindre poids, de dimensions restreintes et ayant subi l'influence d'une solidification aussi rapide que le permet la coulée en coquille épaisse, on a constaté des liquations encore très accentuées.

On en jugera par les analyses faites sur un lingot d'acier *Martin* du poids de 450 kilog. environ et de 1 mètre de hauteur.

1° — HAUT	C	S	Ph	Mn
Bord.	0,330	0,040	0,033	0,420
Centre	0,530	0,077	0,057	0,430
2° — BAS	**C**	**S**	**Ph**	**Mn**
Bord.	0,280	0,029	0,016	0,390
Centre	0,290	0,030	0,038	0,390
3° — MILIEU	**C**	**S**	**Ph**	**Mn**
Bord.	0,320	0,025	0,025	0,400
Centre	0,320	0,048	0,048	0,400

Les parties où le métal mère s'est solidifié presque instantanément

au contact de la coquille ont conservé une composition à peu près homogène, la teneur en carbone ne variant que de 0,280 à 0,330 et l'on peut aussi considérer le lingot comme suffisamment homogène dans la moitié de sa masse inférieure.

« La segrégation est moins accentuée dans les lingots de métal extra-
« doux, coulés dans des moules en fonte de forte épaisseur, quoiqu'elle
« ne soit cependant pas négligeable.

« Le manganèse est l'élément le plus uniformément réparti dans
« l'acier.

« D'une manière générale, il paraît impossible de soustraire au phé-
« nomène de segrégation l'acier coulé, dur ou doux, soit en grande ou
« en petite masse. Même pour l'acier à outil fondu au creuset et coulé
« en petits lingots de 30 à 40 kilogr., il est rare de rencontrer une barre
« de deux à trois mètres d'une parfaite homogénéité.

« L'examen microscopique décèle des différences entre deux échan-
« tillons pris à des places voisines d'une pièce martelée ou laminée.
« On a donc affaire à un mal inévitable, mais dont on peut cependant
« atténuer les effets en grande partie en les localisant *(Pourcel)*. »

Nous reproduirons enfin, pour terminer ces notions si essentielles sur la composition chimique d'un lingot d'acier, et à *titre d'exemple*, un mode d'expérimentation pratiqué par M. *Brustlein* aux aciéries d'*Unieux*, dans le but d'apprécier, par les essais mécaniques, la loi de variation de la résistance du métal dans les diverses régions d'un lingot (1).

Un lingot d'une tonne fut coulé rond pour une commande d'un cylindre creux en acier dur; après forgeage au pilon et recuit, c'est-à-dire élévation au rouge cerise clair de la température du lingot refroidi après forgeage, on pratiqua une saignée détachant la partie supérieure de ce lingot. Puis, au-dessous, une rondelle de métal de 0 m. 040 d'épaisseur fut découpée; elle aurait occupé dans le lingot brut la place indiquée en pointillé dans la figure; c'est-à-dire qu'elle était placée un peu au-dessous de l'entonnoir probable du retrait.

Dans cette rondelle A, on a coupé deux barreaux B et C placés tous deux comme l'indique le croquis; dans le milieu du barreau C on a tourné directement une éprouvette *C* destinée à être rompue par traction suivant son axe, de 0 m. 100 de longueur et de 13 mm. 8 de diamètre.

(1) Rapport de la commission des méthodes d'essais.

D'un autre côté, on a étiré au marteau le barreau B en une barre carrée E de 0 m. 022 de côté et de 1 m. 200 de longueur environ ; cette barre a été recuite après étirage au marteau. A 0 m. 050 de chacune des extrémités de cette barre, on a pris deux longueurs de 0 m. 160

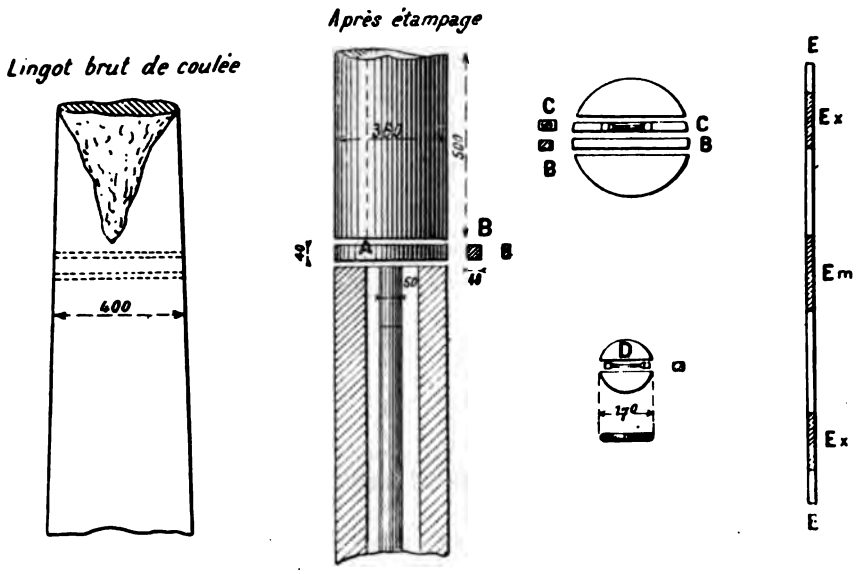


Fig. 75 et 76.

dans lesquelles on a coupé des éprouvettes de traction de mêmes dimensions que C et que nous appellerons E*r*, E*x*.

Enfin, on a coupé, exactement dans le milieu de la barre E, une troisième longueur de 0 m. 160 pour faire une éprouvette E*m*.

D'autre part, le perçage du cylindre laissait une âme pleine cylindrique de 50 mm. de diamètre, on en a coupé le bout à 0 m. 180 de l'extrémité et on l'a fait refouler à chaud sous le pilon en un disque de 22 mm. d'épaisseur et de 0 m. 170 de diamètre. Ce disque a été recuit et suivant un diamètre on a coupé un barreau D à l'outil.

Les essais mécaniques ont montré que la dureté du métal s'écartait peu de la loi que nous avons indiquée précédemment.

Article 2. — Etude physique du lingot.

Si l'on examine un lingot d'acier fondu, on constate aisément son *manque d'homogénéité* au point de vue physique.

Ce lingot a un certain nombre de défauts : les uns que nous qualifierons de *naturels* se produisent toujours et dépendent du métal même ou de la coulée; les autres, que nous appellerons *accidentels*, se produisent, si l'on ne prend certaines précautions indispensables pour les éviter.

Quant à la *structure physique* proprement dite, elle présente certaines irrégularités dont l'examen approfondi est de la plus haute importance au point de vue du travail ultérieur de transformation auquel le lingot devra être soumis.

Parmi les *défauts naturels* des lingots nous citerons :

— Le *vide central*, appelé aussi *retassure* ou *entonnoir de retassement*.

— Les *soufflures*, sortes de poches remplies de gaz.

Parmi les *défauts accidentels* nous citerons :

— Les *criques* dont il a déjà été question lors de l'étude de la coulée en lingotières.

— Les *tapures*, sortes de déchirures ou décollements internes.

I. — *Défauts naturels.*

A. — *Vide central*, ou retassure, ou entonnoir de retassement.

La retassure est une cavité plus ou moins régulière située à la partie supérieure du lingot. Cette cavité, généralement en forme de poire, a sa pointe effilée tournée vers le bas et se forme dans les conditions que nous allons indiquer.

1°) *De la formation et de la position de la retassure.* — Lorsque la lingotière est remplie, le métal commence à se refroidir par l'extérieur; toutes les faces du lingot, sauf celle du dessus, perdent leur chaleur au contact des parois épaisses et relativement froides de la lingotière, la tranche supérieure se refroidit par rayonnement dans l'air.

Fig. 77.

La surface extérieure du lingot, *la peau*, suivant l'expression admise, se solidifie assez rapidement et, quand elle est devenue suffisamment épaisse, constitue une enveloppe rigide.

A ce moment, le liquide contenu dans cette enveloppe occupe un certain volume V : il est resté à une température très élevée et supérieure de plusieurs centaines de

degrés à celle de la peau. Pour arriver à l'état solide, l'intérieur du lingot doit subir un retrait considérable et prendre un volume V' < V et comme il est contenu dans une enveloppe peu déformable, il se formera forcément une cavité sensiblement égale à V—V'.

C'est cette cavité qui constitue la *retassure*.

Cette appréciation théorique du vide central est, en réalité, peu satisfaisante, car nous ne connaissons pas exactement, d'une part, les lois que suivent la conductibilité calorifique et la contraction de l'acier en voie de refroidissement et de solidification et nous ne sommes pas fixés davantage, d'autre part, sur l'importance du dégagement gazeux et la quantité de gaz emprisonnés dans cette cavité centrale, dès les premiers instants de la solidification.

Nous donnons toutefois, et *pour mémoire seulement*, les résultats suivants signalés par M. le professeur *Howe* :

« Sur 78 lingots pour rails, pesant chacun 1500 kilog. environ, que « l'on a cassés dans une usine *Bessemer* américaine, tous, sauf deux, « présentaient une retassure ou une foule de cavités pressées les unes « contre les autres dont l'enveloppe constituait à proprement parler « la retassure.

« *Dans trente d'entre eux leur volume variait de 300cc à 2240cc ; la « moyenne étant de 492cc.* »

La zone qui entoure la retassure est composée de métal plus ou moins *souffleux* (poches à gaz ou soufflures) devenant ensuite *spongieux*

Fig. 78.

Fig. 79.

Fig. 80.

Fig. 81.

et de plus en plus compact, à mesure que l'on s'éloigne davantage du centre du lingot, jusqu'à ce que l'on arrive aux bulles ou soufflures situées au contact de la lingotière.

La partie moyenne seule du lingot présente une structure réellement

compacte, plus ou moins cristalline et possédant la densité normale de l'acier.

La retassure se produira dans la partie du lingot restée liquide la dernière, c'est-à-dire celle qui se sera refroidie le moins vite.

Dans un lingot cylindrique, la retassure est placée plus haut que dans un lingot tronconique dont la grande base est à la partie inférieure, car dans le premier, l'acier des couches supérieures reste plus longtemps liquide.

Dans un lingot couché, dès le démoulage, sur une de ses grandes faces, la retassure se trouve très près de la face opposée.

La retassure d'un lingot dont la conicité est dirigée de bas en haut est située très près de la grande base.

Cette position de la retassure varie avec *la nature de l'acier* (dur, doux ou spécial), *avec la lingotière employée* et *avec le mode de coulée.*

Dans les lingotières métalliques à parois très épaisses, le pied et les faces latérales d'un lingot coulé *à la descente* se refroidissent beaucoup plus rapidement que le haut.

Il en résulte que la retassure est généralement située dans la moitié supérieure du lingot, et d'autant plus haut que le métal aura été coulé plus chaud.

Dans la *coulée en source*, le jet liquide pénètre par le bas et cette partie du lingot est entretenue à une température plus élevée que dans la coulée *à la descente*. Il en résulte que la retassure sera située plus bas. C'est là, du reste, un des inconvénients de la coulée en source.

Ce phénomène de la retassure n'est pas propre à l'acier, il se produit pour toute matière fondue coulée dans un moule relativement froid et qui passe progressivement de l'état liquide à l'état solide. On le retrouve, par exemple, en coulant de la mélinite dans les obus.

2°) *Moyens employés pour localiser la retassure.* — Quel que soit le travail subi par la partie du lingot où se trouve la retassure, les traces de cette dernière subsistent. Le forgeage peut l'aplatir mais n'en soude point entre elles les *parois généralement oxydées ;* le métal n'est pas utilisable. Il n'y a donc qu'une solution : supprimer la partie du lingot qui contient la retassure.

Dès lors, il y a intérêt à éloigner le plus possible cette retassure du centre, et comme elle se forme dans la zone restée liquide la dernière, on cherche à reporter cette zone vers le haut du lingot.

A cet effet, on coiffe le haut de la lingotière métallique d'un moule

en sable étuvé dont la carcasse extérieure est comme dans la plupart des moules constituée par un châssis relativement léger en métal.

On dit qu'on coule en *masselotte :* dans ce cas, cette épaisse garniture de sable conduisant mal la chaleur retarde le refroidissement en cette région du lingot. Souvent, ce moule supplémentaire en sable est porté au préalable au rouge avant de l'assembler sur la lingotière en fonte lors de la coulée, toujours dans le but de retarder le refroidissement de l'acier dans la partie supérieure. La retassure R s'y forme, et la *masselotte* M, destinée à être séparée plus tard de la partie saine du lingot, n'est utilisée au cours des opérations ultérieures de transformation que pour faire la queue de griffage et rendre plus facile le maniement de la pièce.

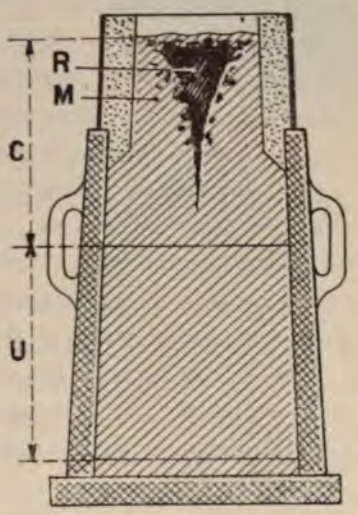


Fig. 82.

R, retassure. — *M*, masselotte. — *C*, chute du haut. — *U*, partie utilisable.

Le métal liquide, qui tenait la place de la retassure au moment où on achevait de couler le lingot, est descendu pendant le refroidissement en vertu de son poids dans le vide qui tendait à se former au centre du lingot. On traduit ce fait en disant que la masselotte *nourrit le lingot.*

Nous croyons que c'est aux usines de *Terrenoire* (Loire) que le procédé de coulée en masselotte a été employé en *France* pour la première fois vers 1870.

a) *Chute du haut.* — La chute du haut, c'est-à-dire le métal supprimé à la partie supérieure, est variable selon les exigences des divers cahiers des charges. Admettons 25 à 30 0/0.

b) *Chute du bas.* — Le bas du lingot est, en général, la partie la plus saine, et cependant on est obligé en pratique d'en supprimer une portion. Cela tient à l'opération du forgeage qui étire le lingot, refoule son extrémité inférieure, y produit des doublures, des déchirures analogues à celles que donnerait un laminage.

Il est donc nécessaire d'affranchir cette extrémité, bien que le métal lui-même soit sain. Enfin, il faut compter que la partie inférieure contient quelques débris entraînés lors du premier jet de coulée, etc...

Le rapport du poids total du lingot au poids de la pièce produite se nomme la *mise au mille*. C'est le nombre de kilogrammes du lingot nécessaires à la production de 1000 kilogr. de métal utile.

3° *Dispositifs spéciaux*. — Le professeur *Howe* indique dans sa *Métallurgie* quelques dispositifs spéciaux employés pour localiser la retassure.

Si l'on plaçait une série de lingotières les unes sur les autres séparées par des diaphragmes réfractaires perforés, chaque lingot servirait de masselotte au lingot immédiatement inférieur et la retassure pourrait être concentrée dans le lingot du dessus.

Cette disposition paraît recommandable pour les séries de lingots à *bandages pour roues*, etc., on peut l'appliquer aussi pour des lingots ordinaires pyramidaux. A cet effet, on abaisse le lingot aussitôt que sa croûte est prise et on en coule un second sur la tête du premier, ils s'unissent par le centre et le second nourrit la retassure du premier.

Dans le cas de petits lingots, la couche froide due à l'intermittence de la coulée permet la séparation facile des lingots pourvu qu'on la fasse alors que la partie soudée est encore assez chaude pour n'être pas résistante.

Dans la disposition *Boulton* (Métallurgie *Howe*), on emploie un châssis vertical dans lequel on maintient quatre lingotières placées l'une au-dessus de l'autre, à l'aide de lames à ressorts. La première lingotière posée dans l'appareil possède un fond, on la remplit quand elle occupe la partie supérieure de l'appareil. On la recouvre alors d'un diaphragme en amiante perforé, puis on place par dessus une lingotière sans fond; on fait descendre alors les deux lingotières à l'aide d'un mécanisme approprié, la lingotière vide occupant maintenant la position qu'occupait tout d'abord la première.

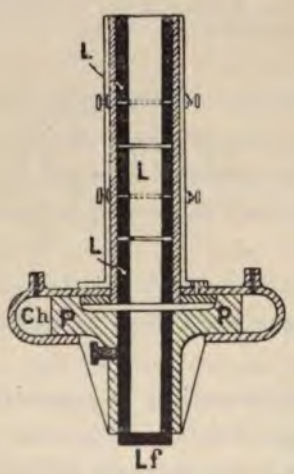


Fig. 83. — *Disposition Boulton.*

L, lingotière. — *Ch*, cylindre hydraulique. — *P*, piston. — *Lf*, lingotière à fond.

La deuxième lingotière une fois remplie, on la recouvre d'un diaphragme d'amiante, on place une troisième lingotière par dessus et ainsi de suite. Après que trois lin-

gotières ont été remplies, l'appareil se trouve dans la situation indiquée par la figure.

La première lingotière ayant atteint le fond de l'appareil et la quatrième se trouvant en position pour la coulée, un piston hydraulique placé dans le cylindre de base est alors poussé contre la première lingotière pour provoquer ainsi la rupture de son lingot d'avec le lingot suivant, comme l'indique la figure. Le second piston opposé au premier ramène la lingotière dans sa position primitive, la colonne de lingotières et de lingots est ensuite poussée de nouveau vers le bas et ainsi de suite. Les diaphragmes d'amiante qui séparent les lingots rendent plus facile leur rupture à l'endroit du joint.

B. — *Soufflures.* — Les *soufflures*, petites cavités ou poches remplies de gaz, occupent généralement le cœur et une zone assez rapprochée de la *peau* du lingot. Elles proviennent sans aucun doute des gaz interposés dans le métal ; ce dernier, se solidifiant plus ou moins rapidement, suivant la conductibilité du moule ou de la lingotière, suivant la composition chimique, suivant la température de coulée, laisse échapper ces gaz en tout ou en partie.

1° — *Répartition des soufflures dans le lingot.* — Dans un lingot qui s'est refroidi tranquillement, les soufflures sont réparties sur une zone parallèle aux faces du lingot et dirigées perpendiculairement à ces faces. Elles affectent la forme d'une ampoule à pointe effilée, la pointe tournée vers la face la plus proche.

Fig. 84.

Un métal doux se solidifiant rapidement sera toujours beaucoup plus bulleux qu'un *acier dur* qui, restant beaucoup plus longtemps liquide, permet aux gaz de se dégager à l'intérieur : les soufflures du pourtour du lingot sont d'autant plus rapprochées du centre et d'autant plus nombreuses que le métal est plus doux, moins fluide.

Quand la coulée a été trop froide, les soufflures sont en général disséminées dans toute la masse du métal. Les lingots coulés trop chaud présentent des soufflures dont la pointe traverse la peau même du lingot; en outre, coulé trop chaud le métal peut se soulever en bouillonnements capables de causer des vides en un point quelconque du lingot. En définitive, on voit qu'il y a un juste milieu à observer et ce n'est que par

l'expérience qu'on détermine la température normale correspondant à une bonne coulée pour l'acier considéré.

Dans *les aciers extra-doux*, la zone des soufflures est très rapprochée

Fig. 85.

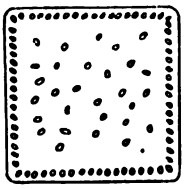


Fig. 86.

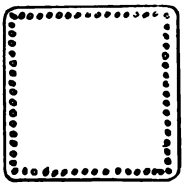


Fig. 87.

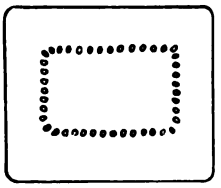


Fig. 88.

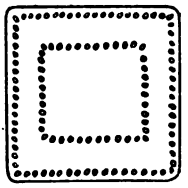


Fig. 89.

du centre ; il y en a quelquefois deux fort importantes plus ou moins distinctes, l'une près de la peau du lingot, l'autre plus près du centre, surtout quand ces aciers ont été coulés un peu froid.

Au point de vue des *soufflures*, il semble qu'une coulée extra-chaude soit à rechercher; cette remarque a été faite il y a longtemps déjà par la comparaison des aciers de même dureté obtenus au *Bessemer* et au *Martin*, le métal *Bessemer* coulé certainement plus chaud que le second étant généralement plus compact.

2° — *Moyens employés pour atténuer les soufflures ou pour les faire disparaître.* — Ainsi qu'il ressort des considérations précédentes il faut couler l'acier à la température normale pour sa nuance.

Coulé trop froid, le métal se fige immédiatement sur les parois et enferme une partie des gaz qui auraient dû se dégager au dehors en circulant librement dans la masse.

Coulé trop chaud, le métal contient une plus grande quantité de gaz occlus et la croûte extérieure se forme avant que le centre soit suffisamment refroidi pour abandonner les gaz qui se seraient dégagés à la température normale.

En admettant que la coulée se soit effectuée dans les meilleures conditions possibles, un acier préparé à la façon ordinaire sera toujours plus ou moins souffleux.

Il existe des moyens de faire disparaître les soufflures d'un lingot,

d'atténuer considérablement leur formation ou même d'empêcher à peu près complètement qu'elles ne se produisent dans le lingot, en coulant ce qu'on a appelé un *acier sans soufflures*.

Ainsi, un acier ayant été élaboré à la façon ordinaire dans un appareil producteur quelconque, on peut par des moyens mécaniques employés dès la coulée sur le métal encore liquide atténuer considérablement la formation des soufflures *(compression de l'acier liquide*, etc...).

On peut aussi se proposer d'élaborer un acier qui, une fois coulé, donne un lingot ou une pièce non souffleuse ; c'est ce qu'on a déjà nommé un acier *coulé sans soufflures*. Il faut alors faire usage de réactifs spéciaux dont il a été question dans la première partie de ce Traité. (*ferro-silicium*, *ferro-manganèse-silicium*, etc...).

Dans ce cas, l'acier non bulleux peut ne pas être coulé en lingots mais dans des moules donnant, comme avec la fonte, l'objet sous forme finie n'ayant pas besoin d'être façonné à chaud.

C'est pour cela qu'en pratique les expressions « *aciers à moulages* » ou « *aciers coulés sans soufflures* » sont synonymes.

Cependant, le moyen le plus généralement employé est de soumettre au forgeage le lingot qui est forcément souffleux lorsque l'acier dont il a été constitué n'a pas été traité par les réactifs auxquels on a fait allusion plus haut.

Au cours de cette opération effectuée à haute température, on pétrit le métal en aplatissant les soufflures dont les parois internes, non oxydées, puisqu'elles contiennent surtout, comme nous le verrons, H et Az, peuvent se souder entre elles et faire disparaître la solution de continuité. On admet alors qu'après une réduction suffisante de la section primitive du lingot les soufflures ont été suffisamment aplaties ; cette réduction de section s'appelle le *corroyage*.

Nous ne craignons pas de répéter que, quoiqu'il soit possible d'obtenir des aciers à peu près exempts de soufflures par les procédés chimiques, l'industrie a toujours recours au forgeage des lingots pour les pièces devant résister à de grands efforts dynamiques, car le forgeage *fait bien disparaître les soufflures, mais améliore aussi très notablement les qualités intrinsèques du métal.*

L'histoire des aciers coulés sans soufflures sera faite dans un article spécial à la fin du présent chapitre ; nous y étudierons les procédés mécaniques et chimiques employés pour éliminer les soufflures *dans l'acier encore liquide*, soit qu'un traitement mécanique approprié ait été

appliqué au métal avant sa solidification dans la lingotière, soit qu'on ait employé un réactif dans l'appareil d'élaboration lui-même. Le procédé d'élimination des soufflures par le forgeage fait partie intégrante du travail même de l'acier et sera traité au titre suivant.

II. — *Défauts accidentels*

Les défauts accidentels des lingots sont les *criques* et les *tapures*.

Nous savons que les *criques* sont des déchirures longitudinales ou transversales, celles-ci moins graves que les premières : elles proviennent d'ordinaire des difficultés de retrait qu'éprouve l'acier pendant sa solidification.

Nous ne reviendrons pas sur ce que nous avons dit précédemment sur ce sujet à propos de l'examen critique que nous avons fait des sections des lingotières.

A. — *Définition des tapures.* — On nomme *tapures* des déchirures internes qui peuvent prendre naissance dans les conditions que nous allons indiquer. Ce défaut est d'autant plus grave que le plus souvent il ne donne à l'extérieur aucun indice de sa présence. Il peut compromettre complètement la solidité de la pièce, soit au moment où il se produit si la déchirure est de grande étendue, soit plus tard si son étendue est faible.

Une tapure constitue, en effet, dans le métal, une solution de continuité qui peut s'agrandir sous de très faibles efforts : un changement de température à l'air libre suffit pour cela, et on a vu des exemples nombreux d'obus ou de plaques de blindages se brisant spontanément en magasin sans autre cause apparente. Ces pièces ont été toujours soumises à des traitements métallurgiques spéciaux qui ont souvent placé l'acier dur dont elles sont constituées dans un état d'équilibre assez instable pour qu'il puisse être rompu à la suite d'un mouvement moléculaire à peine appréciable.

Les *tapures* sont des défauts très graves, provoquant le rebut des lingots ; elles sont dues, en général, à un chauffage ou à un refroidissement trop rapide de la pièce considérée.

B. — *Tapures par réchauffage.* — On conçoit que si un lingot froid est placé dans un four très chaud, les couches extérieures arrivent rapidement au rouge et se dilatent considérablement avant

que l'intérieur ne soit assez chaud pour avoir changé de volume d'une façon sensible. Il en résulte une tendance à la séparation des couches extérieures qui se produit fatalement dès que l'allongement limite du métal à la température considérée est dépassé.

On verra, du reste, que l'acier présente entre 200 et 300° un maximum de fragilité. Si les couches externes exercent sur les points arrivés à cette température une tension supérieure à celle qu'ils peuvent supporter, le métal se brise. Le décollement qui donne lieu à une tapure se produit brusquement, il est accompagné d'un bruit qui, dans les gros lingots, est assez violent. Les tapures par réchauffage se produisent, de préférence, dans le haut du lingot où le métal étant le plus carburé présente le moins d'allongement. Elles affectent ordinairement dans un lingot carré la forme indiquée par la figure ci-dessus.

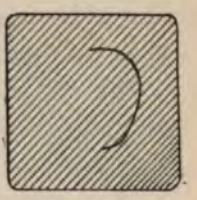


Fig. 90.

C. — *Tapures par refroidissement.* — Pendant le refroidissement trop rapide d'un lingot les couches externes refroidies les premières cherchent à prendre leur retrait, mais en sont partiellement empêchées par le centre du lingot encore à une température élevée. Ces couches sont donc en tension et si l'effort est suffisant, lorsqu'elles arrivent au point critique, entre 200 et 300°, elles cèdent et se brisent comme l'indique la figure ci-contre, le plus souvent suivant les plans diagonaux qui constituent des plans de faiblesse ainsi qu'on le verra plus loin.

Fig. 91.

Enfin un phénomène spécial qui a reçu le nom de *recalescence* peut encore accentuer la pression des couches internes sur les couches superficielles. D'une manière générale, la *recalescence* correspond à un dégagement de chaleur qui s'effectue vers le rouge sombre à la suite de transformations d'ordre chimique dont il sera plus tard très longuement question.

D'après ce que nous avons dit; les aciers durs, soit par le carbone, soit par le silicium, qui offrent moins d'allongement que les aciers doux, seront plus sujets aux tapures et nécessiteront de plus grandes précautions.

Les tapures peuvent aussi se produire à la trempe.

Elles sont encore dues, dans ce cas, à un état d'équilibre moléculaire plus ou moins instable établi à la suite du refroidissement brusque des couches externes.

D.— *Recherche des tapures.*— Il est parfois possible de reconnaître si un lingot contient une tapure au son que rend le métal frappé au marteau. Dans les parties saines, le choc du marteau donne un son clair et prolongé ; le son est au contraire bref et sourd aux environs de la tapure. Ce n'est que par de minutieuses précautions pendant les opérations de chauffage et de refroidissement qu'on peut préserver les lingots des tapures.

Nous signalerons seulement, et pour mémoire, l'appareil inventé par

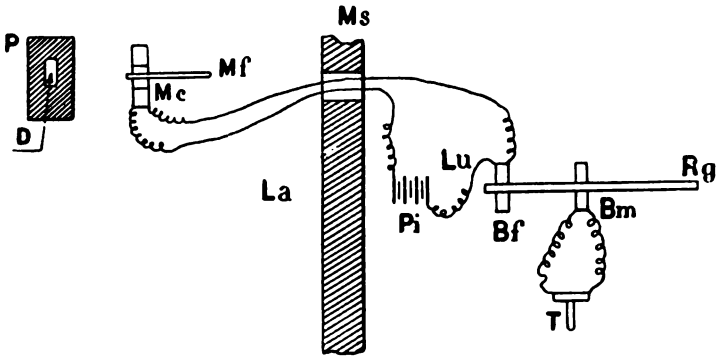


Fig. 92.

P, pièce de métal à vérifier. — *D*, défaut à constater. — *Mf*, marteau frappeur. — *Mc*, microphone. — *Ms*, mur de séparation. — *Pi*, pile. — *Bf*, bobine fixe. — *Bm*, bobine mobile. — *T*, téléphone. — *Rg*, règle graduée. — *La*, local d'audition. — *Lu*, local de vérification.

le capitaine *de Place* pour la recherche des cavités intérieures des pièces métalliques et appelé *Schiséophone.*

La figure schématique ci-dessus fait comprendre le fonctionnement de l'appareil.

Le schiséophone comprend un *microphone, un marteau frappeur, une pile sèche, une règle portant deux bobines, deux téléphones* et une boîte renfermant le tout.

Un frappeur animé d'un mouvement alternatif de va-et-vient et traversant un microphone percute le bloc ou lingot à vérifier. La résonance obtenue est en raison du plein ou du vide et de l'intégrité du métal

frappé par le marteau-frappeur. Le microphone spécial a ses charbons mis en vibration suivant l'intensité de la résonance. Le courant qui est fourni par la pile varie proportionnellement aux résistances créées par les défauts de contact dus aux vibrations des charbons. Comme ce courant traverse la bobine inductrice, la bobine induite est induite proportionnellement à ces variations de courant : il en est de même pour le téléphone intercalé dans son circuit.

Si donc on éloigne la bobine mobile induite sur la règle graduée, on finit par n'entendre presque plus rien dans le téléphone. On arrête alors la bobine induite et quand le marteau-frappeur percute sur une soufflure, une tapure, un vide, la résonance venant à changer, le son change dans le téléphone. (Extrait du rapport de M. *Clérault* de la commission des méthodes d'essai).

III. — *Structure physique*

A. — *Notions générales.* — C'est à *Tchernoff*, alors qu'il était directeur-conseil de l'usine d'acier fondu d'*Abouchoff* (*près Saint-Pétersbourg*) que l'on doit les premières recherches scientifiques ayant pour objet de définir la *structure physique* des lingots d'acier.

Plus tard, des recherches du même ordre ont été faites par d'autres expérimentateurs, une science nouvelle dont la voie est à peine tracée a été créée ; c'est la *métallographie microscopique*. Sans anticiper sur les quelques notions générales que nous donnerons plus tard sur la question, nous pouvons dire que le but de cette science est de découvrir non seulement les lois qui régissent la constitution physique des aciers mais encore celles suivant lesquelles se répartissent, d'après les traitements auxquels on les soumet, les divers constituants qui les différencient.

Tandis que pour exposer les bases de la *métallographie*, il importe d'avoir été fixé au préalable sur les méthodes de travail des aciers, l'exposé des travaux de *Tchernoff* constituera, au contraire, comme une sorte d'étude préliminaire fort utile pour se rendre compte des moyens métallurgiques employés pour modifier la structure physique de ces métaux.

D'une manière générale, en examinant de près la cassure d'un lingot d'acier on remarque souvent, en allant de la surface au centre, d'abord une *couche prismatique* se composant d'un assemblage de prismes

irréguliers et perpendiculaires à la surface extérieure du lingot. La liaison entre ces prismes n'est pas grande, de sorte que les lingots présentant une pareille structure se cassent avec grande facilité et la cassure de la couche aiguillée se fait le long des surfaces de contact de ces prismes.

La couche prismatique plus ou moins importante est suivie d'une *couche granulée* plus ou moins développée, c'est-à-dire d'un assemblage de grains irrégulièrement polygonaux.

Ensuite la *couche granulée* est suivie d'une épaisseur de métal compact ayant une cassure beaucoup plus luisante que celle des régions précédentes du lingot.

Enfin on passe à une zone où la *friabilité* croît jusqu'à l'axe du lingot où l'on rencontre la *retassure*.

B. — *Genèse de la cristallisation.* — La solidification du métal a rapidement lieu au contact de la lingotière et lentement vers le centre du lingot.

1° — *Formation du cristal.* — En observant les parois de la retassure, on remarque qu'elles sont garnies de petites aiguilles qui forment un

Fig. 93. — Parois de la retassure.

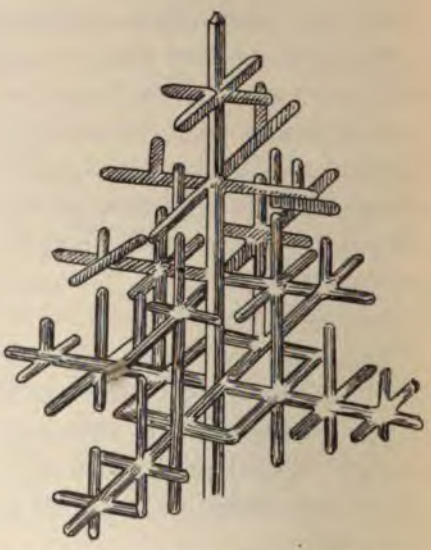


Fig. 94. — Développement des cristaux. — Direction des axes.

groupe de cristaux d'acier enchevêtrés les uns dans les autres. Un amas

de pareils groupes de cristaux dans le vide central représente une masse poreuse dans laquelle on rencontre des vides assez grands. L'observation au microscope montre que ces groupements sont formés de cristaux de croissance développés suivant la direction d'*axes octaédriques*, l'un de ces axes correspondant à la plus grande longueur du cristal et surpassant toujours les deux autres, de sorte que chaque cristal de croissance affecte la forme allongée.

Outre ces axes de premier ordre, et à mesure qu'on s'éloigne du sommet du cristal vers sa base, on rencontre des *axes de second, de troisième ordre*, etc., etc... d'abord à peine formés, ensuite de plus en plus développés, qui forment pour ainsi dire les chevrons articulaires du cristal octaédrique. La figure 94 représente un pareil cristal.

La longueur des cristaux suivant la plus grande dimension varie entre 3 et 5 mm., leur épaisseur est au maximum de 1mm. 5.

De nombreuses observations sur la structure des parois de la retassure démontrent que plus l'acier est dur, c'est-à-dire plus il contient de carbone, mieux sont formés les cristaux de croissance.

L'agrandissement des cristaux n'est pas strictement régulier, quelquefois l'agrandissement d'un côté surpasse celui de l'autre, les axes du second ordre se développent plus vite que quelques axes du premier ordre et prennent à ces derniers leur matière : il en résulte que les axes se rencontrent, se croisent et renferment entre eux un espace rempli d'acier liquide.

Quant à la composition chimique des cristaux, l'expérience montre quelle est toujours celle de la région du lingot dans laquelle ils se développent ; il n'y a, à cet égard, rien de spécial à signaler.

2° — *Relations des cristaux les uns avec les autres.* — Examinons

Fig. 95.

Fig. 96.

d'abord les relations existant entre les directions des axes des cristaux.

a) — *Perturbation des axes.* — D'abord, les cristaux de croissance n'occupent pas entre eux des positions parallèles ; leurs axes principaux se croisent suivant des directions diverses, comme l'indiquent les figures ci-dessus.

Quelquefois ces cristaux ont crû ensemble, ils ressemblent alors à des cristaux hémitropes. On voit représentés ci-dessous et agrandis 140 fois deux cristaux d'acier dont l'un est hémitrope. Ces cristaux ont été

Fig. 97.

Fig. 98.

pris dans la cavité d'un lingot d'acier de 250 kilos. Dans le cristal hémitrope de gauche, au lieu de se croiser sous un angle quelconque, les axes de deux cristaux voisins se sont développés parallèlement.

Mais l'absence du parallélisme des axes ou, comme on dit, ce phénomène de la « *perturbation des axes* », qui est le cas général, peut s'expliquer par deux causes agissant simultanément :

En premier lieu, la lenteur du refroidissement s'accomplissant des parois vers le centre favorise la formation d'un grand nombre de centres de cristallisation avec les directions d'axes les plus diverses, le métal n'étant en aucun point dans les mêmes conditions de température. On sait, en effet, combien paraît complexe la loi de refroidissement et combien incertaines sont les données que nous possédons à cet égard.

En second lieu, le centre du lingot restant longtemps dans un état apparent d'accalmie contribue lui-même à la perturbation des axes, et cela d'autant plus facilement, que le métal se retassant et s'affaissant donne lieu à un mouvement général qui, quoique très lent, suffit ce-

pendant pour faire dévier les axes des cristaux à l'état naissant.

b) — Relations des cristaux déjà formés avec le métal encore liquide. Le métal liquide contribue sans cesse à fournir la matière des formations cristallines qui l'entourent ; mais, comme en même temps s'opère la contraction du volume du métal, il reste dans chaque espace un petit vide plus ou mois important que l'on a appelé retrait local ou particulier.

Il est évident que le manque de matière pour développement régulier des cristaux ne peut pas être bien vite suppléé, si le métal entourant devient épais et perd sa mobilité, ce qui a lieu pour le durcissement des parties extérieures du lingot.

Voilà pourquoi l'on rencontre un métal de plus en plus poreux en arrivant au centre du lingot. La friabilité des parties centrales n'est donc autre chose que l'accumulation des retraits locaux plus ou moins grands.

c) — Couches extérieures des lingots. — Comme les parois de toutes les cavités et de la partie poreuse qui entoure la retassure sont formées de cristaux de croissance plus ou moins développés, on en conclut que la solidification de l'acier ne se fait pas par l'épaississement constant des couches parallèles mais par l'augmentation des cristaux de croissance, à partir des parois refroidissantes de la lingotière.

Fig. 99 et 100.

Les axes principaux de ces cristaux sont perpendiculaires à la surface refroidissante de la lingotière, ainsi qu'on peut le voir sur les figures ci-dessus représentant, fort agrandis du reste, des groupes de cristaux accolés de la couche prismatique. La structure radiale de la cassure de la couche extérieure du lingot démontre ce fait d'une manière évidente, quand l'acier est coulé assez chaud dans une lingotière métallique pour qu'il ne se forme pas de soufflures extérieures ou seulement en très petit nombre.

Si l'on considère un lingot à section circulaire et dont le diamètre soit *très faible*, les rayons parviennent à atteindre le centre du lingot ; si la section est carrée, on aperçoit dans la cassure transversale un carré à diagonales bien marquées sur lesquelles se rencontrent les

sommets des cristaux perpendiculaires à la surface extérieure du lingot.

Le long de ces diagonales sont disposés ce qu'on appelle les *plans de faiblesse* si bien connus dans les coulées de fonte trempée.

Or, plus les cristaux en croissant sont serrés et plus le développement

Fig. 101.

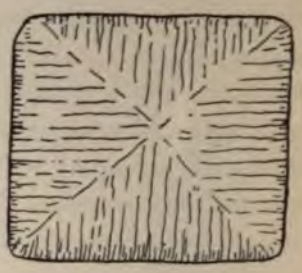


Fig. 102.

de leurs axes est rapide, plus l'arrivée du métal encore liquide est difficile pour remplir les vides, même lorsque ce métal voisin est encore bien chaud. C'est dans de pareilles circonstances que se trouvent les couches extérieures d'un lingot coulé en lingotière métallique et c'est ce qui explique la formation de la couche prismatique du lingot et la cohésion assez faible des prismes. Les vides locaux se distribuent, en ce cas, de préférence entre les plans de contact des cristaux prismatiques se développant normalement à la surface refroidissante.

La granulation qui suit la couche extérieure prismatique s'explique

Fig. 103.

Fig. 104.

bien par les effets dus à la solidification du métal. La liaison primitive entre les surfaces de contact des grains polygonaux formés dès les premiers instants du refroidissement se rompra sous l'effet du retrait et l'on verra dans la cassure des grains séparés.

3° — *Cristaux des soufflures.* — En observant le vide des soufflures, on remarque ordinairement que la partie inférieure est à contour hémi-

sphérique poli et que les parois latérales, surtout à la partie supérieure, sont garnies de petits cristaux dendritiques à contours les plus divers.

En comparant avec attention ces dendrites avec les cristaux de croissance de la retassure, on s'aperçoit qu'ils se ressemblent pour la plupart et que les dendrites des soufflures dérivent des cristaux de croissance que les bulles de gaz rencontrent lorsque l'acier, déjà fort pâteux, s'oppose au passage facile de ces bulles.

Fig. 105.

Ces gaz produisent en se dégageant une rotation et une séparation des cristaux qui nagent dans l'acier liquide et comme ces cristaux ayant presque la même température que lui sont encore très délicats, ils se courbent en partie, sont rongés aisément par le métal en fusion et s'accrochent l'un contre l'autre formant des dendrites de formes fort capricieuses dont il est souvent bien difficile de reconnaître la ressemblance avec des cristaux de croissance.

Il résulte de là que, pour annihiler les cristaux de croissance déjà formés, c'est-à-dire pour les dissoudre complètement dans l'acier liquide il suffira de produire un faible mouvement de la bulle de gaz et son passage entre les cristaux de croissance aidera à les ronger.

Tchernoff indique ensuite le principe du procédé qu'il propose pour améliorer la structure physique des lingots. Nous allons en dire quelques mots.

C. — *Moyen proposé par Tchernoff pour améliorer la structure.* — D'après *Tchernoff*, il est possible d'annihiler la structure prismatique des couches extérieures des lingots d'acier coulés dans une lingotière ainsi que les retraits locaux ou la porosité des parties centrales des lingots d'acier.

Pour cela, *Tchernoff* conseille d'imprimer pendant la coulée un mouvement de rotation rapide à la lingotière ; d'après lui, les cristaux d'accroissement normaux à ses parois ne pourront pas croître aussi vite que dans le cas de leur croissance tranquille et par conséquent la soli-

dification de l'acier se fera par couches *unies* et *amorphes*. La rotation devra continuer jusqu'à ce que le centre du lingot soit solidifié à son tour.

La vitesse de rotation devra être aussi grande que possible à l'origine et comme le métal liquide commencera à tourner peu à peu il faudra communiquer à la lingotière au bout d'un certain temps une rotation en sens inverse.

Le professeur *Howe* cite à l'appui un cas d'application de la méthode couronné de succès pour couler des roues motrices de locomotives, la vitesse de rotation ayant atteint jusqu'à 50 tours par minute pour décroître graduellement ensuite.

On a aussi proposé, dans le même ordre d'idées, de frapper rapidement à coups de marteau les faces de la lingotière et de provoquer ainsi dans le métal des vibrations qui contrarieront la cristallisation.

L'expérience n'a pas sanctionné ces diverses méthodes d'agitation du métal pendant le passage à l'état solide. On a bien reconnu, il est vrai, une diminution des soufflures et même de la retassure, ainsi qu'une formation cristalline plus régulière, sans interposition de vides aussi nombreux que dans un refroidissement tranquille ; mais le résultat obtenu, appréciable sans doute, n'est pas en rapport avec la complication que réclame l'outillage nécessaire pour une pareille installation et les frais de main-d'œuvre supplémentaires.

ARTICLE 3. — LES ACIERS COULÉS SANS SOUFFLURES.

Couler l'acier *sous forme de moulage* comme le bronze et la fonte et dans un grand état de compacité, traiter le lingot de telle sorte que *les soufflures ne puissent pas se former* ou *qu'une fois formées on puisse les éliminer presque complètement*, sont des objectifs poursuivis avec opiniâtreté depuis de nombreuses années par les Ingénieurs sidérurgistes de tous les pays.

Il y a deux classes de procédés employés pour réaliser des *aciers dits sans soufflures*.

1° LES PROCÉDÉS CHIMIQUES — Ils consistent à arrêter par des réactions spéciales la formation des gaz dans l'acier fondu de façon à obtenir les objets en commande sous *forme de moulages*, sans avoir recours aux moyens mécaniques.

2° LES PROCÉDÉS MÉCANIQUES	Ces procédés s'appliquent au lingot c'est-à-dire sans qu'on ait rien changé à la méthode d'élaboration ou de fusion de l'acier.	(*a*) Le lingot brut de forme simple et *souffleux* est soumis au *forgeage* : laminage ou pilonnage. *C'est le fond du travail de l'acier dont l'étude sera détaillée et traitée au titre suivant.* (*b*) L'acier, encore liquide dans sa lingotière dès la coulée, y est soumis à une forte compression (procédé *Whitworth*). Nous étudierons ce procédé dans le présent article.

I. — *Les procédés chimiques.*

C'est aux usines de *Terrenoire* (Loire), aujourd'hui disparues, que revient l'honneur d'avoir résolu scientifiquement le problème de la réalisation *d'aciers coulés sans soufflures.*

A. — *Quelques mots sur l'usine de Terrenoire.* — En 1823, M. Frérejean installe à *Terrenoire* des hauts-fourneaux et une forge à l'anglaise.

L'usine passe ensuite par une série de transformations et fait partie de diverses sociétés ; en 1857, elle appartient à la *Compagnie de Terrenoire, La Voulte* et *Bessèges*, compagnie déclarée en faillite en 1888.

Au point de vue des progrès métallurgiques on ne peut méconnaître que cette usine, appelée longtemps « *le laboratoire de la Loire* », n'ait rendu des services considérables à l'Industrie ; elle a succombé pour des causes tout à fait en dehors de notre sujet.

En 1868, *Terrenoire* passe avec la compagnie des chemins de fer P.-L.-M. le premier grand marché de rails en acier et construit des fours *Martin*. L'utilisation des vieilles matières (scrap process) constitue la base des procédés d'élaboration.

En même temps, des études de premier ordre sont entreprises concernant le rôle des corps étrangers dans les aciers ; certains Ingénieurs pensent que le phosphore peut être conservé à teneur appréciable si le métal est pauvre en carbone.

Pour ce qui a trait à la fabrication des *aciers doux*, l'usine de *Ter-*

renoire comprend la première, en France, l'utilité de se servir comme réactif dans le bain d'acier de fontes riches en manganèse.

En 1874, le procédé de fabrication des aciers sans soufflures est mis au point après des essais que nous allons relater. Pour réaliser cette fabrication, nous savons qu'elle parvient à obtenir au haut-fourneau le *siliciure de manganèse* ou *ferro-manganèse silicium*, appelé depuis *silico-spiegel*.

C'est la fabrication des aciers sans soufflures qui conduit l'usine à prendre l'initiative des études si importantes concernant la *trempe* et le *recuit* des aciers (1875). Elle affirme alors un peu témérairement, on doit l'avouer, qu'on peut donner aux aciers toutes leurs qualités *sans forgeage*, c'est-à-dire sans travail mécanique de transformation et uniquement à l'aide des opérations calorifiques de la trempe et du recuit.

Signalons enfin l'emploi comme minerai de fer du résidu des pyrites servant à la fabrication de l'acide sulfurique sous forme de briquettes agglomérées avec de la chaux. Grâce à l'utilisation de cette matière bon marché et à plus de 50 0/0 de fer, l'usine put, malgré la découverte de la déphosphoration, continuer à fabriquer des produits communs (rails, par exemple). Ces produits ne pouvaient alors être économiquement obtenus que dans les usines de l'Est de la France avec les minerais phosphoreux, ou sur le littoral avec du charbon anglais et des minerais espagnols ou algériens.

Lors de l'exposition de 1889 le travail de la liquidation s'achevait à l'usine de *Terrenoire* : dix ans auparavant, à l'Exposition de 1878, elle avait présenté une collection de fontes spéciales et de moulages d'acier qui montraient le degré de perfection qu'avait atteint la fabrication, sous l'initiative d'ingénieurs hors de pair.

B. — *Genèse de la fabrication des aciers sans soufflures* (1). — Il y a déjà longtemps que les fabricants d'acier de l'étranger ont pu réaliser les premiers aciers *coulés directement sans soufflures*, soit en lingots, soit en moulages.

1° — *Historique de la fabrication à l'étranger*. — *Krupp* exposait à Paris en 1855, à Londres en 1862 et à Paris encore en 1867 des lingots et des moulages en acier sans soufflures fondu au creuset. D'autres

(1) Ces renseignements ont été tirés d'un travail fort documenté de M. Ferd. Gautier.

usines allemandes, parmi lesquelles la célèbre usine de *Bochum*, exposaient, en 1855, des cloches en acier assez dur : ces moulages faisaient entrevoir, dès cette époque, la substitution probable de l'acier au bronze et à la fonte pour de nombreux usages.

En 1862 à Londres et en 1867 à Paris, on voyait, venant des usines allemandes, des *roues pleines en acier fondu, moulé et recuit,* en piles venues d'un seul jet de coulée et chacune d'un poids de près de 10 tonnes. A chaque Exposition les dimensions des pièces allaient en croissant; en 1867, on pouvait admirer des lingots de 40 tonnes d'une remarquable homogénéité.

Mais c'était surtout sur les magnifiques pièces obtenues par voie de moulage que se fixait tout particulièrement l'attention des métallurgistes français, plutôt que sur les lingots sains et homogènes destinés au forgeage.

Nous savions simplement en France que jusqu'aux environs de 1865 on produisait ces aciers au creuset exclusivement, avec des dosages plus ou moins variés, mais où les additions de *Spiegeleisen*, si abondant en Allemagne, jouaient déjà le principal rôle C'étaient, en un mot, d'après les suppositions les plus vraisemblables, des aciers fondus au manganèse, à doses variables de carbone, moulés tantôt en coquille, tantôt dans des moules en terre.

Dès que vers 1865 et 1866 le procédé *Bessemer*, après 6 à 8 ans de tâtonnements, fut devenu courant, on apprit que certaines usines avaient obtenu des aciers difficiles à laminer ou marteler, mais donnant de très beaux moulages, très homogènes.

La fabrication des aciers sans soufflures semblait donc un secret possédé presque exclusivement par les usines allemandes.

Il était réservé à la Compagnie de *Terrenoire* de découvrir les divers artifices de cette importante fabrication, de divulguer la méthode employée et d'aller encore plus loin que les usines étrangères dans cette voie féconde de production.

2° — *Origine de la fabrication à Terrenoire.* — En 1871 les usines françaises et étrangères se préoccupèrent d'assurer la fabrication d'obus en fonte dure susceptibles de traverser les plaques de blindage employées pour le cuirassement des navires ou des casemates.

Gruson, dans son usine de *Buckau-Magdebourg*, fondait au cubilot des fontes au bois avec du spiegeleisen et coulait en coquille à une température aussi basse que possible.

En *Angleterre*, aux ateliers de *Woolwich*, le capitaine *Palliser* réalisait une remarquable fabrication par des mélanges de fonte au cubilot (obus Palliser).

L'usine de *Saint-Jacques à Montluçon* fondait sur la sole d'un four *Martin* un mélange de fonte grise et de fonte ayant subi un léger mazéage.

Des essais du même genre avaient lieu vers la même époque aux usines de *Terrenoire ;* on désirait obtenir des fontes gris clair pour obus de rupture douées d'une grande résistance au choc et susceptibles de prendre, par le refroidissement en coquille, une trempe énergique. Un bain de fonte très siliceuse était versé sur la sole d'un four *Martin*, on y ajoutait des quantités croissantes de chutes de rails d'acier jusqu'à ce qu'on arrivât à un métal prenant suffisamment la trempe en coquille et doué d'une grande résistance au choc.

Afin de mieux étudier les proportions les plus convenables on prit, à des intervalles très rapprochés et après la fusion bien nette de chaque addition d'acier, des éprouvettes du métal que l'on cassait pour en observer le grain.

Ces éprouvettes montraient tout d'abord une structure compacte et homogène ; puis, tout d'un coup, apparaissaient des soufflures dont l'importance augmentait rapidement. L'analyse fit voir, d'une manière indiscutable, que l'apparition des soufflures coïncidait avec la diminution de la proportion en silicium.

Dans une contre-expérience, une addition de fonte siliceuse fut faite à de l'acier *Bessemer* et à de l'acier *Martin* de nature souffleuse ; les soufflures furent éliminées complètement ; l'acier devint compact et homogène. Il n'y avait plus de doute, le silicium emportait ou détruisait les soufflures de l'acier.

C. — *Théories proposées.* — La première théorie proposée fut celle de la réaction.

1° — *Théorie de la réaction.* — Dans la théorie de la réaction on suppose que les gaz des soufflures consistent exclusivement en oxyde de carbone ; le silicium réagit sur ce gaz en s'oxydant à ses dépens.

a) On croit tout d'abord que CO est l'unique gaz des soufflures. — On croyait tout d'abord que les soufflures étaient uniquement remplies de l'oxyde de carbone résultant de la réaction dominante de l'affinage, à savoir celle du carbone sur les oxydes de fer du bain. Une expé-

rience conduisant à la même conclusion et due à l'illustre *Bessemer* fut ensuite acceptée sans discussion et, si l'on tient compte de la difficulté d'expérimenter à de pareilles températures, on comprendra combien cette opinion s'accrédita aisément.

Au moment de la solidification, le gaz oxyde de carbone primitivement dissous dans le métal y devenait insoluble. Lorsque les soufflures étaient placées dans l'intérieur des lingots sans communication avec l'air extérieur, elles étaient d'un blanc d'argent ; lorsque au contraire il y avait eu par quelque fissure communication avec l'air extérieur, elles prenaient une teinte irisée ou même noire à cause de l'oxyde de fer.

b) M. Ferd. Gautier explique au Congrès de l'Iron and Steel le rôle du silicium. — Dès lors, si l'on admettait la présence exclusive de CO dans le gaz des soufflures ; la disparition de celles-ci sous l'action du silicium paraissait facile à expliquer d'après la réaction suivante :

$$Si + 3CO = SiO^3 + 3C$$

Il se formerait de la silice passant à la scorie et un dépôt de carbone se dissolvant dans l'acier.

Or, de l'aveu même de M. *Gautier*, cette réaction est discutable suivant la température à laquelle on opère ; car si l'acier est très chaud la silice qui tendrait à se former se réduirait au contact du carbone avec production d'oxyde de carbone, le carbure de fer étant un réducteur énergique.

2° — *Théorie de la dissolution.* — Mais bientôt des doutes ne tardèrent pas à s'élever sur cette prétendue réaction du silicium sur l'oxyde de carbone, réaction éliminant les soufflures.

M. *Harmet*, aux aciéries de *Denain*, put extraire de l'hydrogène des gaz d'un lingot d'acier en voie de solidification. Le professeur *Muller* de *Brandebourg*, en perforant sous l'eau et sous le mercure des lingots souffleux, constata la proportion relativement faible de CO absorbé par le métal et la *présence d'une grande quantité d'hydrogène.*

Du moment que la présence de l'oxyde de carbone comme cause des soufflures de l'acier n'était plus solidement établie on accepta l'explication suivante :

Quelle que soit la nature des gaz existant dans les soufflures, celles-ci ne peuvent être occasionnées que par le dégagement de ces mêmes gaz, au moment de la solidification. *Le silicium aurait donc pour effet*

immédiat, et sans invoquer de réaction chimique, de prolonger cette solubilité au delà du point de solidification.

Abstraction faite de la valeur de ces explications, il n'en était pas moins établi que les industriels étaient en possession d'un résultat pratique absolument certain.

Pour avoir un bain d'acier non souffleux, il suffisait, à la fin de l'affinage, d'ajouter de la fonte siliceuse (*ferro-silicium*), soit seule, soit accompagnée de *spiegel* ou de *ferro-manganèse*, ou bien d'ajouter du *silico-spiegel*. Nous renvoyons aux développements antérieurement donnés dans l'étude de l'élaboration des métaux pour ce qui a trait à la pratique et à l'usage combiné de ces fontes spéciales en cours de traitement des aciers.

3° — *Pourquoi les aciers étrangers n'étaient-ils pas souffleux?* — A *Bochum* et chez *Krupp*, nous dit M. *Ferd. Gautier*, on ajoutait des fontes manganésées et aussi de la fonte siliceuse; cette addition se faisait soit dans les creusets, soit pendant la coulée. C'était là le secret de la fabrication ; mais ces aciers se chargeaient aussi de silicium pour d'autres raisons.

Le fait d'être produit au creuset donne à l'acier une aptitude particulière à se charger de ce métalloïde par la réaction inverse de celle qui, dans la *théorie de la réaction*, sert à expliquer la disparition des soufflures. Quand l'acier est très chaud, ce qui est le cas un peu avant la coulée, le carbone de l'acier agit comme réducteur sur la silice libre qui se trouve dans la pâte du creuset selon la réaction :

$$3C + SiO^3 = Si + 3CO$$

réaction signalée tout d'abord par MM. *Troost et Hautefeuille*.

La réaction entre le carbone et la silice, qui donne lieu à la formation de Si et de CO, n'est pas possible sans une affinité supplémentaire qui est ici la présence du fer ; c'est donc, en réalité, le carbure de fer qui est le réducteur ; le graphite, qui entre plus ou moins dans la constitution de la pâte du creuset, ne semble pas intervenir.

Le manganèse agit aussi énergiquement sur la silice, et la réaction :

$$3Mn + 4SiO^3 = Si + 3\ (MnO, SiO^3)$$

est possible. On savait depuis longtemps qu'on ajoutait de l'oxyde de manganèse à la charge des creusets, que ceux-ci étaient sensiblement

attaqués avec formation de silicate manganésifère, mais l'attention ne s'était pas portée sur l'incorporation, de ce fait, d'une certaine quantité de silicium dans l'acier.

On voit donc que pour plusieurs raisons les aciers fondus au creuset se chargent plus ou moins de silicium, et quoique ce corps soit utile pour combattre les soufflures, il serait nuisible en quantité plus forte s'il ne se produisait, en même temps par la réaction même qui l'a introduit, un certain départ du carbone en CO, et par suite, s'il ne se réalisait un adoucissement correspondant de l'acier.

4° — *Action de l'aluminium.* — Avant d'aborder le rôle de ce nouveau réactif, il est nécessaire d'indiquer comment il fit son apparition en sidérurgie.

a). — *Historique de la fabrication.* — Les moulages d'acier doux faits au creuset par addition d'une faible quantité d'aluminium furent présentés, en 1885, à l'*Iron and Steel*, à Londres, par M. *Nordenfelt ;* ils reçurent le nom de *mitis*, à cause de leur extrême douceur.

Ce n'est que plus tard que l'on apprit le mystère de leur fabrication, par un brevet pris par M. *Wittenstrœm*, au sujet d'un procédé destiné à rendre le fer et l'acier plus fluides et plus compacts, par l'addition au métal fondu d'une très faible quantité d'aluminium (moins d'un millième, le plus souvent).

Les aciers *Nordenfelt* obtenus à la fonderie de *Carlswick* (*Stockholm*) étaient fabriqués au creuset dans des fours chauffés au pétrole : on employait des riblons de fer de Suède, et c'est au moment de la coulée que se faisait l'addition bienfaisante d'aluminium pur ou de ferro-aluminium.

La beauté et la compacité de ces pièces moulées causèrent une vive surprise ; les ingénieurs métallurgistes s'empressèrent d'adopter le nouveau procédé et l'étendirent aux fontes de cuivre, de laiton et de nickel.

b). — *Explication de M. Ostberg de Stockholm.* — M. *Ostberg*, à l'Association des *Mining Engineers de Pittsburg*, chercha à rendre compte de l'efficacité de l'addition d'un demi-millième d'aluminium, seul ou en alliage avec le fer, par un *abaissement du point de fusion du métal* qui, restant d'une fluidité extrême, remplissait parfaitement les parties les plus délicates des moules.

M. *Ledebur*, professeur de métallurgie à *Freiberg*, attaqua le premier cette explication, ne pouvant admettre qu'une aussi faible quantité

d'aluminium, toujours inférieure à un millième, pût abaisser de 200° le point de solidification de l'acier.

Il admit que la plus grande fluidité obtenue dans les aciers additionnés d'aluminium tenait uniquement à l'élimination de l'oxyde de fer en dissolution qui rendait le bain pâteux, avec formation d'alumine.

C'est, en somme, la théorie de la réaction.

Pourquoi le dégagement de l'hydrogène et de l'azote cesse-t-il en même temps?

Le problème n'a pas encore reçu de solution.

Il faut se contenter d'admettre que l'oxyde étant réduit, le bain métallique retient dissous des gaz que précédemment il expulsait.

L'aluminium, une fois oxydé, surnage et est rejeté dans les scories.

c). — *Pratique de l'addition d'aluminium.* — Il faut ajouter l'aluminium quand on est sur le point de procéder à la coulée ; le mieux est de l'introduire directement dans la poche ou dans les lingotières, de peur qu'une nouvelle oxydation ne succède à la réduction de l'oxyde de fer s'il était introduit trop tôt.

Les petits morceaux d'aluminium placés dans la poche ou dans les lingotières s'élèvent au travers de l'acier liquide, s'y fondent et s'incorporent rapidement à la masse en calmant le bouillonnement.

D'après le professeur américain *Langley*, les proportions d'aluminium à ajouter pour la réduction intégrale de l'oxyde de fer seraient les suivantes :

NATURE DE L'ACIER	Proportions d'Al.
1° — Acier Martin à moins de 0,5 0/0 de carbone	0,016 à 0,03 °/₀
2° — Acier Bessemer à moins de 0,5 0/0 de carbone.	0,02 à 0,05 °/₀
3° — Acier Bessemer à plus de 0,5 0/0 de carbone.	0,0125 à 0,025 °/₀

La société suisse de *Neuhausen* pour l'industrie de l'aluminium conseille :

Pour l'acier en général. . . . 0,004 à 0,025 0/0 d'Al
Pour le fer fondu. . . . . 0,01 à 0,1 0/0

La plus grande fluidité que l'aluminium communique à l'acier exagère souvent la retassure lorsqu'au lieu de le couler dans des moules on le coule dans des lingotières ou lorsqu'on en ajoute un excès.

Dans ce cas, on peut même avoir des lingots creux sur une grande partie de leur hauteur.

En général, dans les moulages mitis on ne trouve pas d'aluminium, soit qu'il ait réellement disparu par oxydation, soit que le faible excès qui pourrait avoir été ajouté ne puisse se doser par l'analyse chimique.

Ce n'est pas seulement pour les moulages d'acier que l'aluminium peut être utile : pour toutes les autres fabrications dans lesquelles le métal est soumis à un travail de forge on trouvera certainement avantage à partir de lingots plus sains et exempts de soufflures ; cela permettra de simplifier le travail et d'avoir moins de rebuts.

Après avoir été introduit dans la métallurgie de l'acier où il est d'un usage courant aujourd'hui, vu ses effets bien plus marqués que ceux du silicium, l'aluminium commence à être employé dans celle de la fonte : il en sera question en temps opportun.

5° — *Les explications de M. U. Le Verrier.* — L'influence bien constatée des divers réactifs, dit M. *U. Le Verrier*, n'est pas bien facile à expliquer.

La théorie de la dissolution ne suffit pas à rendre compte comment des doses aussi faibles de silicium peuvent exercer sur la solubilité une action sensible ; c'est encore pis quand il s'agit de l'aluminium dont il ne reste pas trace dans le métal.

Un corps qui agit en s'éliminant ne peut guère avoir qu'une influence chimique. Il est remarquable d'ailleurs que pour les trois réactifs qui préviennent la production des soufflures, à savoir M*n*, S*i* et A*l*, l'efficacité relative croisse en proportion de leurs affinités chimiques pour l'oxygène et soit en raison inverse des doses qu'on emploie.

Tout cela fait penser qu'il devait y avoir du vrai dans l'ancienne théorie, *dite de la réaction*.

M. *le Verrier* propose de concilier les deux théories en modifiant un peu le rôle qu'on attribue à CO ; au lieu d'être la cause directe des soufflures, il n'en serait que l'occasion, mais l'occasion nécessaire. C'est lui qui en se dégageant provoquerait le départ de H, qui sans cela resterait dissous.

On verse dans un verre de l'eau gazeuse, l'effervescence se calme

bientôt; cependant, l'eau contenant toujours de l'acide carbonique, l'effervescence ne réapparaît que si l'on agite le liquide.

De même, quand on verse de l'acier dans un moule, le dégagement de H peut se calmer s'il n'y a pas de cause étrangère pour l'entretenir : mais si la production de CO entretient le bain dans un état d'agitation, H continue à se dégager avec effervescence. Or, si l'on prévient ou si l'on arrête la formation de CO par l'emploi de certains réactifs on supprimera sinon la cause réelle, au moins l'occasion déterminante des soufflures.

Quant à l'augmentation de fluidité, elle s'explique aisément par l'énergie avec laquelle l'aluminium réduit les oxydes et les silicates mélangés au bain; or, des traces de scorie suffisent pour rendre le métal visqueux.

6° — *Expériences sur la dissolution des gaz dans les fontes et les aciers.* — Les traités didactiques de métallurgie parlent peu des expériences faites à ce sujet par MM. *Troost* et *Hautefeuille* (1867). Elles priment cependant par ordre de date un grand nombre de celles qu'on se plaît à citer et sont d'une grande importance.

a) *Expériences de MM. Troost et Hautefeuille.* — La fonte, surtout la fonte manganésifère, portée à une haute température dans une nacelle en charbon, éprouve dans le gaz hydrogène une fusion tranquille; si après l'avoir laissée longtemps dans cette atmosphère, on diminue rapidement la pression du gaz hydrogène, on voit de nombreuses projections de globules métalliques et de paillettes de graphite attester le dégagement du gaz absorbé par le métal.

Si l'on abaisse en même temps la température, la solidification se produit pendant le dégagement gazeux et la surface du lingot devient rugueuse : on exagère ainsi les effets ordinaires du rochage.

Le silicium diminue beaucoup la solubilité de H, le manganèse l'augmente dans de grandes proportions.

L'oxyde de carbone, fait important à noter, se dissout en quantité bien moins notable dans la fonte. La présence du manganèse diminue la solubilité de ce gaz et peut même l'annuler.

La fonte après sa solidification retient des gaz qu'on peut extraire en les chauffant à une température qui ne doit pas dépasser 800°; H est en quantité beaucoup plus considérable que CO dans la fonte solide.

L'acier dissout notablement moins de gaz que la fonte : H y est comme dans les fontes en plus grande proportion que CO et y est aussi plus énergiquement retenu que ce dernier.

b) *Expériences du professeur Muller.* — M. *Muller* a constitué un appareil de forage pour recueillir les gaz des soufflures des lingots froids, en opérant sous l'eau ou sous l'huile.

Il a trouvé des résultats différents suivant les nuances d'acier et le mode de coulée, mais il a cru pouvoir conclure de ses nombreuses expériences pour le détail desquelles nous renvoyons au *Stahl und Eisen* de 1883-1884, que les gaz des soufflures sont surtout composés d'H et d'Az et contiennent fort peu de CO et de CO^2.

Une de ces analyses moyennes a donné les résultats suivants :

H . . .	78,5 0/0
Az . . .	20,5 0/0
CO^2 . . .	0,2 0/0
CO . . .	0,8 0/0

Ces gaz sont absorbés en très grande quantité par l'acier à la température de fusion, soit à l'état de combinaison comme le pense M. *Osmond*, au moins en ce qui concerne H, soit à l'état de sursaturation, comme le pense M. U. *Le Verrier*.

D. — *Des moulages d'acier.* — La confection du moule, la coulée, le démoulage, sont des opérations tout à fait analogues à celles dont nous avons donné le détail pour les moulages de fonte. Nous nous bornerons par suite aux notions indispensables et spéciales à l'acier renvoyant, pour la pratique générale de la fabrication, à ce que nous avons dit sur le moulage de la fonte.

1° — *De la qualité de l'acier.* — Un acier convenable pour le moulage doit être fluide, homogène, exempt de soufflures et surtout d'oxydes de fer ; on le fabrique au *four Martin* (1) pour les grandes productions. Les additions dans le four auront été faites, soit à l'aide de ferro-manganèse et de ferro-silicium, soit à l'aide de silico-spiegel, soit par mélange de ces divers réactifs.

L'emploi de l'aluminium, dans les conditions antérieurement spécifiées, supprime l'emploi des fontes silico-carbonées et restreint l'usage du ferro-manganèse à la désoxydation du bain.

On coule toujours dans une poche unique de fonderie ; rarement, la coulée est répartie entre plusieurs poches de petites dimensions.

(1) Cette indication est loin d'être absolue car le convertisseur *Bessemer*, acide ou basique, est souvent employé pour cet usage.

Nous donnons, à titre d'exemple et *pour mémoire*, les chiffres rel à une élaboration d'acier à moulages au four *Martin* ayant donn bons résultats :

Pourcentage de la charge	*Éléments de la fon initiale*
Fonte 16 kil., charge de fusion.	Carbone . . . 3.
Spiegel à 18 0/0, 1 kil. 8, charge de fusion.	Silicium . . . 2.
Riblons (chutes de rails) 80 kil. —	Manganèse . . 1.
Ferro-manganèse à 45 0/0, 1 kil. 2, addition.	
Silico-spiegel à 10 0/0 de silicium, 1 kil., addition.	

L'opération pour 7000 kil. a exigé 7 heures depuis le charger jusqu'à la coulée.

Le métal obtenu avait comme composition :

Carbone . . .	0,100 à 0,500 0/0.
Silicium . . .	0,180 à 0,500 0/0.
Manganèse . .	0,320 à 1,000 0/0.

L'acier à moulages correspond généralement à ce qu'on appell nuance mi-douce dans la gamme des aciers ; on en fabrique quelqu en nuances plus dures et souvent maintenant en nuances très do donnant des pièces en véritable *fer fondu* et d'une très grande r léabilité.

On utilisera pour les moulages de tonnage moyen ou de faible nage l'acier obtenu au *creuset* ou aux *petits convertisseurs*.

C'est à l'aide de ces appareils d'élaboration qu'on produit ordin ment les nuances très douces d'aciers pour lesquelles l'absence de s flures est surtout due à l'emploi de l'*aluminium*.

2° — *Moulage et modelage.* — L'acier en fusion et très chaud se difie rapidement et moins régulièrement que ne le fait la fonte. retrait linéaire de l'acier est beaucoup plus fort et atteint 2 0/0 e ron ; ce retrait varie suivant la composition de l'acier et dans même pièce. Ainsi la différence entre les retraits horizontaux et le traits verticaux d'une pièce coulée debout s'accentuera nettement, a qu'elle eût été négligeable dans une fonderie de fonte. En outre retassure, ainsi qu'on l'a dit plus haut, y sera fort importante.

De là, nécessité de construire les modèles en conséquence, eu é

au retrait, et de ménager de très fortes et nombreuses masselottes, eu égard à la retassure.

Les gaz contenus dans le moule au moment de la coulée, à cause de la température très forte, acquièrent une pression élevée et provoquent parfois des explosions, si l'on n'a eu soin de ménager les évents en nombre suffisant et en bonne place.

Le moule est établi solidement avec des parois plus épaisses que s'il s'agissait de couler de la fonte, bien armé, puis fortement étuvé.

Les sables employés en *France* sont préparés avec la terre de *Voreppe*, les sables de *Vierzon*, les écaillages ou débris pulvérisés de vieux creusets à acier. Naturellement les matières neuves, coûteuses, ne sont employées que pour la confection de la partie du moule en contact avec le métal, le reste est en vieux sable. Le mouleur achève ordinairement le travail par un badigeon de plombagine.

3° — *Traitement des pièces moulées.* — Le retrait de l'acier étant considérable, il en résulte dans la pièce refroidie des tensions énormes qui nécessitent le renforcement de certaines parties de la pièce et notamment des angles rentrants qui tendraient à s'ouvrir et qu'il faut, encore plus que pour la fonte, consolider par des nervures.

Lorsqu'on a démoulé la pièce avec toutes les précautions convenables, on lui fait subir un *recuit* au rouge cerise clair et prolongé pendant un temps plus ou moins long selon son tonnage.

Ce recuit a pour but de donner au métal un grain plus fin et de faire disparaître, disent les praticiens, les efforts de tension qui subsistaient dans le métal.

Le grain de l'acier à moulage est en effet très brillant et relativement gros et son aspect cristallin n'offre rien de bien rassurant pour garantir le métal contre la résistance au choc.

Nous verrons plus loin comment un recuit à haute température permet de l'améliorer.

De plus, à la température du rouge cerise clair, l'acier est très malléable, et cède aux efforts de tension en se déformant très légèrement. En prenant ensuite librement son retrait, chacune des parties de la pièce conserve l'équilibre qui s'est établi à chaud.

Pour opérer ce recuit, on chauffe d'abord lentement la pièce au point voulu, on l'y abandonne assez longtemps dans cet état pour permettre à la structure de l'acier de se modifier entièrement d'après un mécanisme qu'on expliquera ultérieurement.

Enfin, on laisse tomber le feu et le four se refroidit lentement. Quelquefois on opère autrement; quand la température du rouge cerise clair a été atteinte, on ouvre les portes du four de façon à provoquer une chute brusque de température, puis on les referme après avoir déchargé la grille pour permettre à la pièce de continuer lentement le refroidissement final. On opère ainsi, ce qu'on appelle souvent une *trempe à l'air*.

Après le recuit, il faut visiter la pièce avec soin, tâter au burin les amorces de criques qui ont pu se produire et enlever également au burin les nervures de soutien venues de moulage avec la pièce. Puis on l'envoie aux ateliers d'ajustage pour la soumettre au travail à froid de finissage : tournage de certaines parties, alésage des trous d'axe, enlèvement des surépaisseurs à la machine à raboter, etc...

Telle est, en général, la série des opérations effectuées pour obtenir un moulage d'acier, nous y trouvons une opération métallurgique nouvelle qui n'existait pas pour la fonte, c'est le *recuit*. On peut cependant, pour des moulages soignés et devant résister à de plus grands efforts, les soumettre à une opération métallurgique supplémentaire qui est celle de la *trempe* à l'eau, à l'huile, etc... ; mais ce n'est pas le cas général.

Il importe, en effet, de signaler, et nous insisterons plus tard sur ce point, le danger qui résulte de cette opération métallurgique pour les pièces qui ne présentent pas des formes simples. En dehors des propriétés précieuses, sans doute, que récupère un métal trempé, il naît, de par cette opération même, un état d'équilibre nouveau pour la matière : lorsque les formes sont compliquées, et c'est le cas des moulages, il peut se produire des *tapures*. Aussi, la trempe n'est-elle appliquée que dans des cas spéciaux aux moulages d'acier et encore faut-il recommander des trempes douces à l'eau chaude, à l'huile ou aux métaux fondus, dont la théorie et la pratique seront exposées plus loin.

4° — *Considérations d'ordre économique.* — Par le moulage on supprime tout le travail de transformation mécanique à chaud, pour donner presque définitivement sa forme à l'objet à fabriquer.

L'économie réalisée de ce fait paraît considérable.

Il importe toutefois de tenir compte des frais énormes occasionnés par la confection des moules, l'étuvage, etc... et les opérations accessoires dont nous n'avons donné qu'un rapide aperçu.

Suivant la nature des objets en commande, et si l'organisation du travail ne concourt pas constamment à l'abaissement du prix de revient, *cette fabrication peut ne pas être rémunératrice.*

Toutes les fois qu'il s'agit de reproduire un grand nombre de pièces identiques, on devra avoir recours à la fabrication mécanique des moules et des noyaux.

Le travail à main d'homme devra être supprimé, quand ce sera possible, dans les opérations de finissage. L'ébarbage, en particulier, sera avantageusement pratiqué à l'aide de la machine-outil.

Pour le nettoyage des surfaces, certaines usines ont pu projeter avec force un jet de sable entraîné par un courant de vapeur.

Enfin, la matière même dont sont constitués les moules doit être judicieusement choisie si l'on veut donner aux moulages des surfaces polies.

M. *de Billy* (Revue des progrès récents de la Métallurgie du fer) cite d'après l'Engineering Review, le procédé de MM. *Kuhlmann*, d'Iserlohn (Westphalie) consistant à torréfier le sable, puis après l'avoir pulvérisé, à l'imbiber d'une solution aqueuse de chlorure d'ammonium. La vapeur de ce sel engendrée à la paroi des moules, lors de la coulée, empêcherait le métal liquide de pénétrer dans le sable, donnant ainsi au moulage une surface absolument nette.

Sans attacher à ces recettes une importance exagérée, nous tenons néanmoins à les signaler, pour montrer qu'aucun détail ne doit être négligé dans une fabrication où les opérations partielles sont aussi délicates et en nombre aussi grand.

II. — *Procédés mécaniques*

A. — *Historique du procédé par compression.* — Parmi les procédés mécaniques employés pour éviter la présence des soufflures dans les lingots, on peut citer le refroidissement rapide des lingots par une circulation d'eau autour des lingotières, la mise en vibration des lingots en frappant les lingotières de coups répétés pendant la solidification de l'acier (*Tchernoff*) ou en les agitant en leur imprimant un mouvement giratoire spécial (*Webb*) et enfin l'action du vide ou de la pression sur la masse du lingot en fusion.

Nous ne nous occuperons que de la *compression de l'acier liquide dans les lingotières* par le procédé *Whitworth*. Ce n'est pas que *Whit-*

worth en ait eu le premier l'idée, car ce procédé proposé par *Bessemer* en 1856 fut appliqué en *France* par plusieurs fabricants et aussitôt sinon même plus tôt qu'en *Angleterre*, mais sur une échelle fort réduite. Le procédé *Whitworth* a mis longtemps à faire son chemin à travers le monde ; assez répandu en Amérique, il vient de s'établir dans un de nos plus grands établissements industriels (Le *Creusot*).

L'application directe d'une pression énergique sur le haut du lingot ne peut être exécutée avec succès qu'au moyen de presses hydrauliques; les essais avec la vapeur n'ont pas réussi, même avec des pressions de 17 atmosphères. On avait proposé aussi l'injection sous un couvercle solidement adapté à la partie supérieure de la lingotière d'une quantité d'eau suffisante pour exercer, en se vaporisant, une pression considérable, sans aucun succès du reste, car la pression trop faible était aussi trop instantanée.

La mise en pratique de la compression date du premier brevet de *Whitworth* en 1866.

Le procédé est aujourd'hui appliqué en grand, principalement: aux usines de *Whitworth*, à *Manchester* — aux forges d'*Abouchoff* près de *Saint-Pétersbourg* — aux usines de *Bethlehem* (*Pensylvanie*) — aux usines du *Creusot* en *France*, etc.

B. — *Description des appareils employés.* — Nous décrirons successivement les lingotières et les presses.

1°) — *Lingotières pour acier comprimé.* — Les lingotières pour acier comprimé, dites *mouleaux*, sont constituées par un tube d'acier forgé de 100 mm. d'épaisseur, fretté comme un canon et muni de tourillons pour son levage.

L'intérieur est garni de douelles en fonte disposées de manière à ménager le long des parois les évents nécessaires à l'issue des gaz, tout en consolidant le garnissage constitué par une couche de 20 mm. environ de débris de vieux creusets et de kaolin recouverte d'un enduit à la mine de plomb.

Le moule est fermé à la partie inférieure par une plaque d'acier recouverte d'un garnissage réfractaire de 20 mm. d'épaisseur. Pareil garnissage est appliqué au disque supérieur terminant le piston plongeur de la presse hydraulique.

Les mouleaux, préalablement desséchés et chauffés, sont placés auprès de la presse qui les dessert.

2°) — *Presses à comprimer.* — La presse, construite en 1866 par *Whitworth*, à la suite de son premier brevet, avait un piston de 305 mm. de diamètre capable d'exercer une pression de 250 tonnes. Spécialement destinée à la fabrication de pièces creuses, telles que les obus, cette presse portait un noyau ménageant le vide intérieur de l'obus et un piston destiné à comprimer l'acier dans la capacité annulaire remplie d'acier liquide. Les essais exécutés avec cette presse ne tardèrent pas à montrer l'impossibilité de réaliser ainsi une fabrication industrielle d'obus en acier comprimé.

La presse qui fut construite à la suite de ces premiers essais infructueux pouvait exercer une pression de 2000 tonnes ; le chapeau supérieur de la presse pouvant être fixé à une hauteur quelconque portait un plongeur pour fermer la lingotière, la pression s'exerçant par le piston du bas.

Le succès de cette presse conduisait *Whitworth* à la construction de la presse de 8000 tonnes qui assura la réussite du procédé.

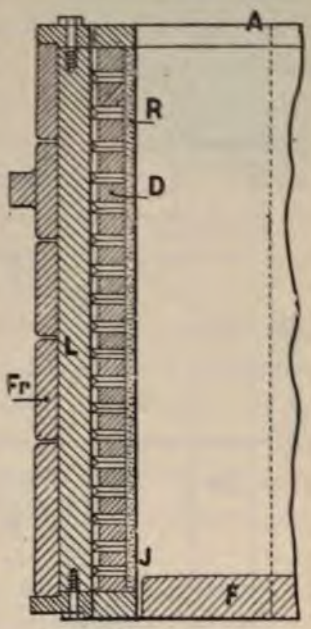


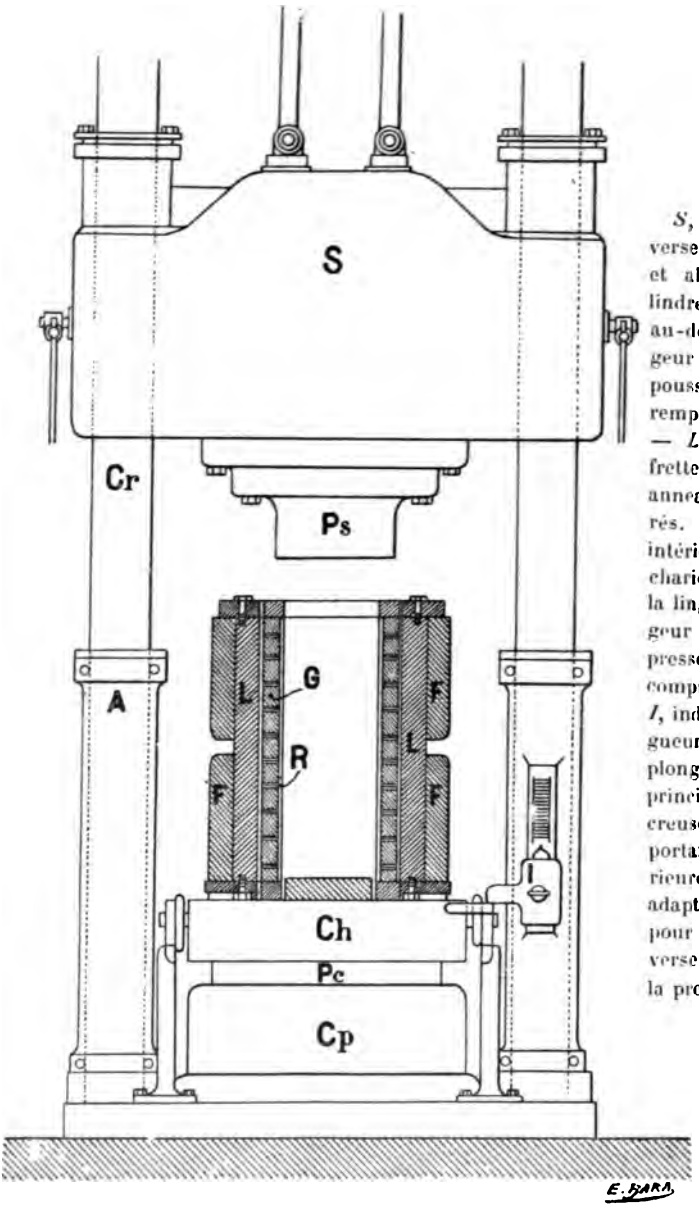
Fig. 106.

A, axe de la lingotière. — *R*, revêtement réfractaire. — *D*, douelles en fonte à évents en assises horizontales. — *L*, lingotière proprement dite, en acier forgé. — *F*, fond. — *Fr*, frette. — *J*, jeu nécessaire pour permettre au fond de se dilater au contact de l'acier liquide.

La lingotière remplie d'acier liquide, reposant sur un chariot spécial, est amenée rapidement au-dessus du plongeur vertical inférieur de la presse hydraulique. On abaisse alors la traverse supérieure jusqu'à ce que son plongeur du poids de 50 tonnes vienne au contact de l'acier liquide obturant ainsi complètement la lingotière. La traverse est fixée définitivement dans la position qu'elle doit occuper. Cette manœuvre n'exige que quelques secondes.

Immédiatement après, le plongeur vertical inférieur, qui porte le système *chariot-lingotière*, s'élève pour que la compression s'exerce sur l'acier. Le rôle de la traverse supérieure a été d'accélérer l'opération puisqu'elle peut se mouvoir plus rapidement que le piston hydraulique ; elle limite, en outre, la course de ce dernier à la quantité dont le lingot doit se raccourcir en réalité par la pression (9 0/0 environ).

3° — *Phases du phénomène.* — Le lingot se contracte rapidement pendant les premières secondes, il importe de lui appliquer la pression



S, sommier ou traverse supérieure relevée et abaissée par un cylindre hydraulique placé au-dessus. — *Ps*, plongeur contre lequel est poussé l'acier liquide remplissant la lingotière. — *L*, lingotière. — *F*, frette. — *G*, garniture en anneaux de fonte perforés. — *R*, revêtement intérieur en sable. — *Ch*, chariot sur lequel repose la lingotière. — *Pc*, plongeur du cylindre compresseur. — *Cp*, cylindre compresseur principal. — *I*, indicateur pour la longueur de l'ascension du plongeur du cylindre principal. — *Cr*, colonne creuse guidant et supportant la traverse supérieure. — *A*, arrêts adaptés aux colonnes pour supporter la traverse supérieure quand la presse est au repos.

Fig. 107. — Presse de coulée de Witworth pour la compression de l'acier liquide.

maxima le plus vite possible : au bout de quelques minutes, la contraction diminue rapidement puis cesse bientôt tout à fait.

Au commencement de la mise en pression, il s'échappe une grande quantité de gaz avec un bruit caractéristique d'une pression très élevée et une flamme bleue due autant à H qu'à CO qui se dégagent. Il se produit souvent après 4 ou 5 minutes de pression des explosions violentes, accompagnées d'une projection abondante d'étincelles et de poussières métalliques. La pression doit être maintenue assez longtemps après que les gaz ont cessé de s'échapper et le métal de se contracter, afin d'éviter, au refroidissement, le développement d'efforts moléculaires internes qui se manifestent souvent par la production de criques ou même de tapures dans la masse du lingot.

Les pressions varient ordinairement de 600 à 1900 atmosphères et ne produisent tout leur effet que si elles agissent assez longtemps. Avec un lingot de 868 mm. de diamètre, il faut, pour assurer une homogénéité parfaite, maintenir pendant 40 minutes une pression de 2100 atmosphères ou 1500 atmosphères pendant 50 minutes. Plus le lingot est volumineux, plus il faut presser fort et longtemps : trois heures pour un lingot de 868 × 630 millimètres.

Le lingot se raccourcit par la pression de 9 0/0 environ. Une pression de 200 à 900 atmosphères suffit pour améliorer considérablement un lingot, mais l'homogénéité parfaite exige l'application prolongée de pressions allant de 2000 à 2300 atmosphères.

4° — *Effets et avantages de la compression.*— Nous pensons qu'on a vu trop exclusivement dans le procédé de la compression de l'acier à l'état liquide un moyen d'éviter les soufflures : sans doute, la compression, même à des pressions relativement faibles, élimine les soufflures dans le métal fondu, mais il ne faut pas oublier que la pression ne s'exerce pas seulement sur le métal liquide, elle se continue sur le métal déjà solidifié. Le maintien de la pression jusqu'à ce que l'acier ait pris une *température à laquelle il ne peut plus cristalliser* nous semble devoir produire des effet très importants, effets fort semblables à ceux qu'a étudiés et décrits *Tchernoff* et que nous avons précédemment relatés.

M. *Howe* paraît avoir donné, à notre avis, une des meilleures explications des effets résultant de la compression. Ce savant professeur considère deux phases dans la compression, suivant qu'elle a lieu avant ou après le passage de l'état liquide à l'état pâteux ; de là, *la compression liquide* et *la compression plastique*.

Il est difficile de voir en quoi la première de ces compressions peut

être avantageuse, les liquides étant pratiquement incompressibles, sauf toutefois si l'acier émet dans cette période une grande quantité de gaz, car alors l'effet de cette compression sera de retarder ou même d'arrêter complètement le dégagement des gaz dont la solubilité augmente avec la pression.

La compression plastique expulsera réellement les gaz qui donnent naissance aux soufflures au travers de la croûte du lingot, comme on expulse par pression l'eau des pores d'une éponge, car c'est surtout au moment de la solidification que les gaz occlus dans l'acier s'en échappent. Elle peut provoquer aussi la réabsorption de tout ou partie du gaz renfermé dans les soufflures et souder leurs parois et celles du vide central ; s'il reste du gaz non expulsé ou non réabsorbé, au moins la pression aura-t-elle diminué le volume des cavités qui le renferment. Ce reliquat de gaz ainsi absorbé ou comprimé ne peut plus se dégager à nouveau ni se dilater, la compression étant maintenue sur le lingot pendant un temps suffisant.

Nous verrons à propos des propriétés mécaniques des aciers quelle part il y a lieu d'attribuer aux effets de la compression pour les différentes *caractéristiques* de leur résistance. Qu'il nous suffise de dire que les lingots soumis à ce travail, pouvant être considérés comme absolument sains, fournissent, après les opérations de transformation à chaud (*forgeage à la presse ou au pilon, laminage*, etc...), des pièces offrant une très grande sécurité et sans déchet appréciable de matière, la retassure étant négligeable.

Nous citerons pour mémoire les lingots de l'usine de *Bethlehem* comprimés à l'état liquide, de 900 mm. environ de diamètre; ces cylindres de plusieurs mètres de long, tronçonnés au tour, ne laissaient voir aucune soufflure, les tronçons les plus rapprochés du haut ne montraient aucun indice de retrait, preuve que le but principal de l'opération était atteint.

Nous renvoyons aux traités spéciaux pour la description d'autres procédés de compression de l'acier liquide dérivant plus ou moins directement du procédé *Whitworth*. Nous citerons, et pour mémoire, les dispositifs de *Daelen*, de *Williams*, *Hinsdale*, etc...

TITRE III

TRAVAIL DE L'ACIER

LA PRATIQUE ET LA THÉORIE

Le présent titre est divisé en deux parties : dans la première nous ne nous occuperons que de la pratique du travail; dans la deuxième nous exposerons les théories si remarquables qui servent à expliquer l'influence des diverses transformations mécaniques ou calorifiques sur les propriétés du métal.

PREMIÈRE PARTIE. — PRATIQUE DU TRAVAIL

CHAPITRE I

TRANSFORMATIONS MÉCANIQUES A CHAUD

L'étude des transformations mécaniques du métal à chaud comprend celles du *forgeage* et du *laminage*.

Le forgeage peut s'effectuer au marteau-pilon ou à la presse ; le laminage, au laminoir ordinaire ou aux laminoirs spéciaux.

ARTICLE 1er. — LE FORGEAGE

Le but poursuivi dans le forgeage est double :

1° Donner approximativement sa forme à la pièce qu'on veut tirer du lingot ;

2° Améliorer le métal.

Les instruments employés sont le marteau-pilon et la presse à forger, appareils dont l'étude purement mécanique ne ressortit pas à notre sujet.

I. — *Le forgeage au marteau-pilon.*

A. — *Quelques mots d'historique.* — Rappelons d'abord qu'on distingue dans un marteau-pilon :

Une masse pesante, le *marteau*, tombant sur une autre masse l'*enclume*, sur laquelle se pose la pièce à forger. L'enclume est maintenue dans une autre pièce de fondation appelée la *chabotte*, et le marteau est guidé par les *montants* réunis à la fois par un *entablement* supérieur qui supporte le cylindre à vapeur, et par les *entretoises* inférieures, placées au sommet de l'ouverture arquée formée par les *jambages*.

Le premier marteau-pilon fut construit au *Creusot* sur les données de *Bourdon*, vers la fin de 1840 : la masse frappante pesait 2500 kilog. et tombait d'une hauteur de 2 mètres. Cette invention fut un événement industriel considérable ; on put désormais forger les grosses pièces entrant dans la construction des machines de marine, du matériel des chemins de fer, etc.....

La masse frappante du pilon primitif, bientôt transformée, fut portée à 3000 kilog. : mais l'expérience ne tarda pas à montrer à *Bourdon* tout le parti qu'il pouvait tirer de son invention et il établit aussi des pilons de plus petit modèle avec des masses frappantes de 1800, 1500 et 1000 kilogr.

En *France*, tous les marteaux-pilons de quelque importance servant au forgeage des pièces mécaniques d'assez fort tonnage sont, en général, à *simple effet*. Les marteaux-pilons à *double effet*, *automoteurs ou non*, les marteaux-pilons *à ressorts*, *à air comprimé*, etc... réalisent une rapidité de mouvement nécessaire surtout pour le forgeage de petites pièces ou de poids moyen qu'on peut amener du premier coup à la forme définitive.

Nous ne nous attarderons pas à parler des diverses transformations subies par ce remarquable appareil dont on rencontre dans les usines les types les plus variés : nous nous contenterons d'une rapide nomenclature qui donnera une idée de son importance.

En 1860, le *Creusot* construisait pour les forges de la Marine à *Guérigny* (Nièvre) un marteau-pilon de 20 tonnes.

En 1873, à l'Exposition de *Vienne*, on remarquait les dessins d'un marteau de 50 tonnes destiné à la fonderie de canons de *Perm* (Russie).

En 1878, à l'Exposition de *Paris*, *le Creusot* montrait un modèle en

bois d'un marteau-pilon de 80 tonnes en construction dans ses ateliers.

Ce pilon, construit depuis lors, subit bientôt une transformation portant de 80 à 100 tonnes le poids de sa masse frappante.

En 1879, les aciéries de *Saint-Chamond* (Loire) ont construit un pilon de 80 tonnes porté aujourd'hui à 100 tonnes et destiné comme celui du *Creusot* à forger les gros canons, les plaques de blindage, pièces de construction pour la marine, etc...

En 1885, la société *Cockerill*, à *Seraing* (Belgique), construisait, pour les aciéries de *Terni* (Italie), un pilon de 100 tonnes.

Enfin en 1886, MM. *Marrel* frères, à *Rive-de-Gier* (Loire), entreprenaient la construction de deux gros pilons, l'un de 50 tonnes, l'autre de 100 tonnes, en marche aujourd'hui.

Entre les types extrêmes de marteaux de deux tonnes et de 100 tonnes viennent se ranger un très grand nombre d'autres modèles parmi lesquels ceux de 25, 30 et 50 tonnes sont utilisés par les forges les plus importantes.

B. — *Le réchauffage des lingots.* — Le réchauffage précède, en général, les opérations mécaniques. Le plus souvent, les lingots après le démoulage sont déposés sur le sol de l'usine où on les laisse se refroidir.

Il ne faudrait pas songer à les livrer aux appareils de transformation mécanique dès leur sortie de la lingotière ; la chaleur y étant répartie tout à fait inégalement, le métal des couches internes encore trop pâteux ne pourrait supporter sans danger le travail du marteau, il se séparerait du métal relativement résistant des couches périphériques en s'écoulant dans la direction de l'axe. C'est donc en partant d'un lingot refroidi à la température ambiante que commence d'ordinaire le travail.

On a cependant essayé de récupérer la chaleur qui, par le refroidissement des lingots à l'air libre, s'y dissipe en pure perte ; de là, la création de fosses ou fours spéciaux recevant les lingots dès le démoulage. Dans ces fosses ou puits, dont il sera dit quelques mots plus loin, la chaleur se répartit uniformément dans toute la masse du lingot ; on peut alors sans danger pour l'acier le soumettre au choc du marteau.

Il reste entendu, par suite, que le lingot destiné au travail est placé froid dans le four à réchauffer.

1° — *Types divers de fours à réchauffer.* — Les fours à réchauffer employés pour le réchauffage des lingots sont des fours avec *foyers à*

grille ou des *fours à gaz*. Nous ne donnerons à ce sujet que quelques indications d'un ordre général.

Il ne nous appartient pas de discuter ici les conditions multiples auxquelles doivent satisfaire les différents systèmes de fours.

Cette étude fort complexe ressortit à la métallurgie générale ; nous nous contenterons d'indiquer les principaux types de fours à réchauffer qu'on rencontre en sidérurgie.

Le réchauffage des lingots se fait presque toujours dans un four à réverbère avec foyer à grille facile à conduire, mais où la chaleur est assez mal utilisée comme il arrive pour le fer et pour l'acier qui exigent une très haute température. Malgré ses inconvénients théoriques, la facilité de son entretien et la possibilité d'utiliser ses flammes perdues pour le réchauffage des chaudières font qu'on préfère souvent ce four aux fours à gaz (*Siemens*, *Bicheroux*, etc...) qui demandent des réparations fréquentes, un personnel exercé à une manœuvre assez complexe, etc... Ces derniers avec gazogènes à vent soufflé, à tirage naturel ou à cuve, présentent toutefois le double avantage de permettre l'emploi de combustibles de qualité inférieure au contact ou au voisinage desquels on ne pourrait pas chauffer le métal à forger et de donner une atmosphère moins oxydante que le foyer à grille, ce qui entraîne un moindre déchet du métal.

Le four avec *foyer à grille* se rapproche du four à reverbère plusieurs fois décrit.

Dans les fours à grille à *plusieurs postes*, il y a à la fois plusieurs lingots pour lesquels le chauffage est, à un moment donné, à des degrés divers d'avancement. Chaque lingot est placé d'abord près du rampant, puis on le fait avancer vers l'autel, par intervalles, à mesure que les précédents lui font place.

On réalise ainsi une sorte de chauffage méthodique. Comme la température ne doit plus être uniforme sur toute la surface de la sole, sa longueur n'est plus limitée : elle peut atteindre 15 mètres et parfois on l'augmente encore en faisant passer les flammes sur une seconde sole superposée à la première. Ces fours utilisent bien mieux la chaleur que les autres. En augmentant la longueur du four et le parcours du chargement, on permettra aux gaz de se mieux refroidir et on économisera le combustible, mais on accroîtra les frais de main-d'œuvre et de premier établissement. Il y aura donc une limite que l'expérience indiquera.

Les fours du type *W. Chisholm* sont à *plusieurs portes* et à *plu-*

sieurs foyers. La sole interrompue par de petits foyers à grille supplémentaires a environ 11 mètres de longueur. On y charge jusqu'à trente lingots à la fois par les nombreuses portes latérales et on n'y

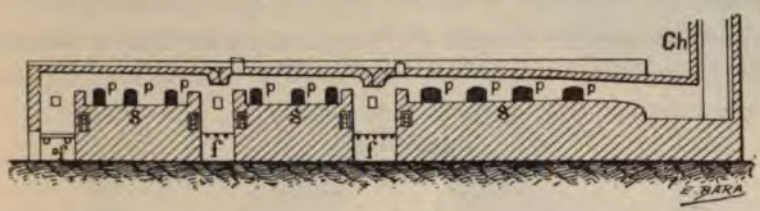


Fig. 108.

f, foyer à grille. — *p*, porte de chargement. — *Ch*, cheminée. — *s*, sole.

consomme, d'après M. *Tunner*, que 210 kilogrammes de houille pour 1000 kilogr. de lingots, tout en utilisant encore les flammes perdues à la production de la vapeur *(Louis Knab)*.

Rappelons l'utilisation du pétrole et du gaz naturel comme combustibles de fours à réchauffer (Pittsburg, Russie, etc...)

Les fours *Siemens*, plus ou moins perfectionnés, sont plutôt en

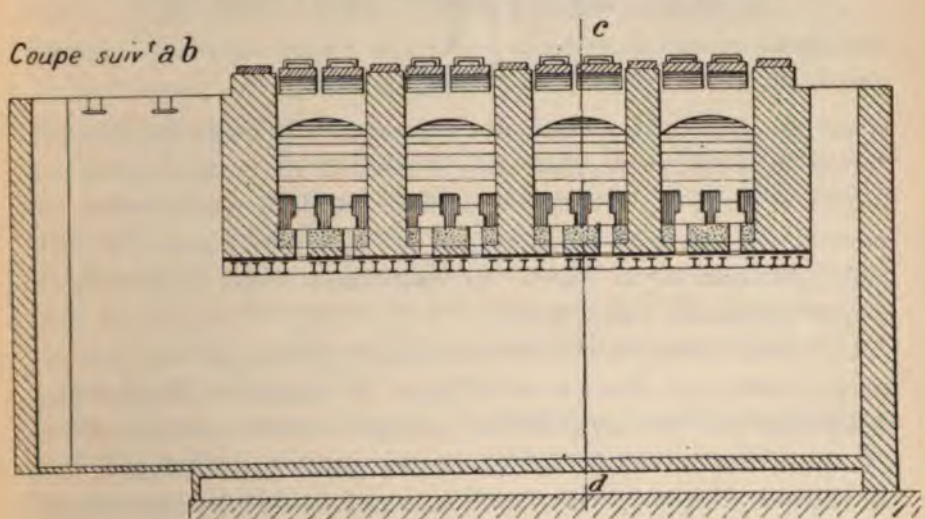


Fig. 109. — Soaking pit Hainsworth.

défaveur actuellement pour le réchauffage des lingots, on en trouve encore cependant en grand nombre dans les anciennes usines.

Nous signalerons le dispositif *Hainsworth* qu'on rencontre en Amérique (fig. 109 et 110).

Ce four, appelé souvent *soaking pit Hainsworth*, et qui n'est qu'un Siemens modifié, présente sur le type ordinaire des fours à gaz l'avantage de réchauffer les lingots en les posant sur la sole par leur plus petite face.

La position verticale donnée aux lingots dans les fours à réchauffer

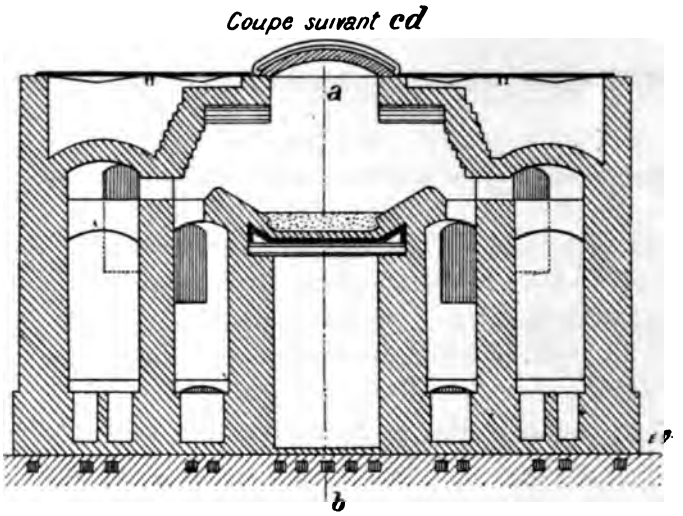


Fig. 110.

et sur les wagonnets présente des avantages, non seulement au point de vue de la manœuvre, mais aussi au point de vue de la propreté des lingots et de la séparation des soufflures et de la retassure vers le sommet. On peut faire fonctionner le four *Hainsworth* comme un véritable égalisateur de la chaleur en remplissant de gaz les cellules du four et fermant les valves à air.

Une pince manœuvrée hydrauliquement et portée par une grue ordinaire suffit pour manœuvrer le lingot; la manœuvre est bien plus compliquée avec les fours Siemens du type normal. Les appareils de chargement et de déchargement consistent généralement, dans ce cas, en chariots à vapeur portant une pince qui vient s'introduire dans le four et saisir le lingot, ces manœuvres étant effectuées par l'action de l'eau sous pression, action produite par des pompes sur le chariot même.

Ces fours à *cellules verticales* reçoivent les lingots dès leur démoulage, c'est-à-dire encore très rouges à leur superficie et très chauds dans leur intérieur.

Quand ils sont trop éloignés de l'aciérie, on y transporte les lingots dans des wagonnets fermés et garnis intérieurement de briques réfractaires dans lesquels ils sont encastrés verticalement.

Le four *Bicheroux* est un type de four à réchauffer au gaz d'une organisation fort simple. On y chauffe l'air en le faisant circuler sous la sole ; ce qui est fort avantageux, comme on sait. Il est acquis, en

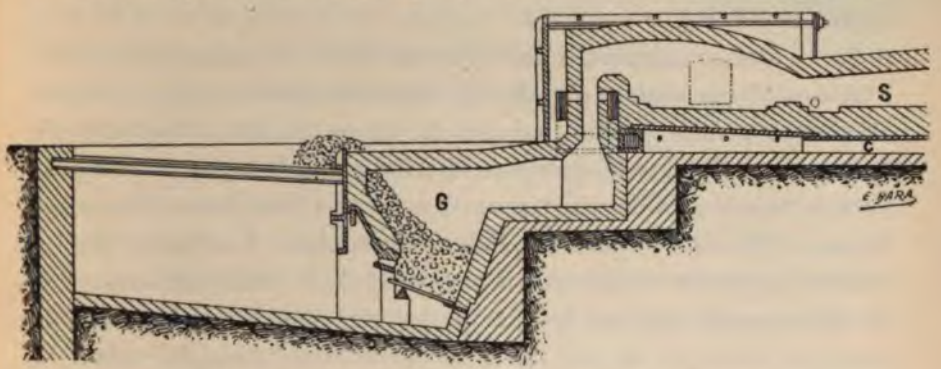


Fig. 111. — Four de réchauffage avec générateur Bicheroux.
G. gazogène. — *S*, sole. — *C*, gaine de circulation d'air.

effet, que, dans les fours à reverbère ordinaires, la chaleur perdue par les parois peut atteindre et dépasser 50 0/0 de la chaleur totale produite par le combustible.

Comme le rayonnement est proportionnel à la surface libre, le tiers au moins doit se perdre par la sole ; on peut donc en retrouver environ 15 à 20 0/0 en chauffant l'air par ce procédé.

Le mode de construction est très simple : le gazogène est accolé au four et fournit directement le gaz combustible, l'air nécessaire à la combustion passe par une série de carneaux placés sous la sole et vient sortir par le pont.

En 1882, un ingénieur anglais, M. *John Gjers*, communiqua à l'*Iron and steel Institute* l'idée ingénieuse qu'il avait eu d'introduire les lingots, en attendant que les appareils de transformation puissent les recevoir, dans de petits puits ou fosses rectangulaires (Soaking pits) servant d'égalisateurs presque absolus de chaleur.

Nous avons dit plus haut que le lingot démoulé renferme plus de chaleur que n'en exigent le martelage ou le laminage ; c'est cette chaleur qu'il s'agit de répartir uniformément dans le lingot.

Une fosse ou *pit* peut à peu près contenir les lingots fournis pour

une coulée ; ces fours ou pits sont disposés dans un massif en maçonnerie réfractaire qui se trouve dans le sol de la halle ; leur section est un peu plus grande que celle du gros bout des lingots, leur hauteur un peu supérieure à la longueur des plus gros lingots qu'on coule d'ordinaire ; on recouvre chacun d'eux d'un couvercle à fleur de sol et après l'avoir bien *desséché et chauffé au rouge*, le pit est prêt à entrer en service.

Les lingots rapidement démoulés sont introduits dans le *pit* recouvert aussitôt, la chaleur s'y répartit uniformément et comme très peu de chaleur peut se perdre, puisque la masse d'acier est entourée de toutes parts d'une maçonnerie aussi chaude que le lingot, la température de la surface s'élève beaucoup. Au bout de vingt à trente minutes, le lingot est retiré et porté au pilon ou au laminoir. La chaleur que les lingots cèdent à la maçonnerie a pour effet de la maintenir toujours à la même température que les lingots les plus chauds ; quand donc on introduit un lingot un peu froid, les parois réfractaires, lui cédant la chaleur qui lui manque, agissent ainsi comme des accumulateurs qui, selon les circonstances, emmagasinent ou abandonnent de la chaleur.

Pendant le séjour des lingots, les *pits* se remplissent de gaz qui s'enflamment quand on enlève le couvercle. L'analyse montre que ces gaz se composent d'H, d'Az et de CO ; donc, dans cette atmosphère, il n'y a pas perte par oxydation comme dans les fours à réchauffer.

Il importe toutefois d'ajouter que les *pits* ne sont vraiment pratiques que dans les installations considérables pour fabrications à grand écoulement et plutôt communes (rails, aciers de construction, etc...) et dans lesquelles les lingots n'ont pour ainsi dire pas à séjourner dans l'aciérie, passant de suite de la lingotière au pit, puis à l'appareil de transformation.

2° — *Précautions à prendre dans la conduite du réchauffage.*— Quel que soit le mode de chauffage du four à réchauffer, si le lingot est froid, il faut avoir la précaution, pour *éviter les tapures*, de le chauffer très lentement de 0 à 400° environ : on peut ensuite sans danger élever rapidement la température du four.

Si l'on se sert d'un four à gaz, il convient d'opérer comme il suit : avant d'y introduire le lingot, refroidir le four en ouvrant toutes les ouvertures, placer la pièce dans le four froid, faire arriver les courants de gaz et d'air. Comme les empilages sont encore chauds, la combustion se produit ; au bout d'un moment, fermer la porte du four.

Quand on a affaire à de très gros lingots, pour plus de sécurité on ne les laisse pas se refroidir au-dessous de 300°, et pour cela, dès qu'ils sont sortis de la lingotière, on les maintient à cette température à l'aide d'un feu de bois jusqu'au moment où on pourra les mettre au four.

Il est acquis, et nous reviendrons sur ce point ultérieurement, que vers 300° l'acier possède un maximum de fragilité, fragilité résultant uniquement de la *forte réduction qu'éprouve la ductilité* à cette température. Si on introduit un lingot d'acier froid dans un four à 600°, l'écart de 600° entre les couches internes et externes de ce lingot produira des tapures. Si, au contraire, on chauffe lentement à cœur ce bloc à 400° et qu'on l'introduise dans un four à 1000°, le même écart de 600° entre ses couches extérieures et intérieures n'amènera aucun accident. L'équilibre de température s'établira dans toute la masse sans que les tensions produites aient amené la rupture des couches internes.

Il ne semble pas que cette zone de fragilité soit fonction de la teneur des aciers en carbone ou autres corps actifs ; cependant, pour les fers ou aciers obtenus par voie de puddlage il n'en serait pas ainsi. Il est rationnel d'attribuer à la scorie qui reste toujours interposée entre les mises le rôle d'un ciment très efficace reliant entre elles très rigidement les molécules du métal.

On surveille la marche du chauffage par des carneaux, c'est-à-dire par des ouvertures pratiquées dans les parois du four et fermées simplement à l'aide d'une brique qu'on peut retirer à volonté. La température à laquelle on veut opérer la transformation mécanique à chaud (*forgeage ou laminage*) est déterminée, soit à l'œil en s'aidant des couleurs lumineuses du tableau de *Pouillet*, soit à *l'aide des appareils pyrométriques* dont nous avons donné la description et l'usage dans nos préliminaires.

D'une manière générale, c'est à la *température du rouge cerise plus ou moins clair* que s'effectue le forgeage de l'acier et ordinairement au rouge cerise très clair si les aciers traités ne craignent pas le feu. Nous verrons plus tard comment varie cette température selon la composition chimique des aciers.

C. — *Quelques exemples de travail au pilon.* — Nous donnons ci-dessous quelques cas de forgeage au pilon se présentant couramment

dans les usines : nous nous bornerons du reste à quelques indications sommaires.

I. — *Forgeage des pièces longues.* — C'est le cas des *canons*, *arbres de transmission*, *pièces d'acier pour outillage* ou pour tout autre usage devant ensuite être débitées en tronçons qui subissent à leur tour un travail de transformation, etc...

Le forgeage proprement dit comprend deux opérations distinctes :

a) Le martelage ou étirage pendant lequel se produit la diminution

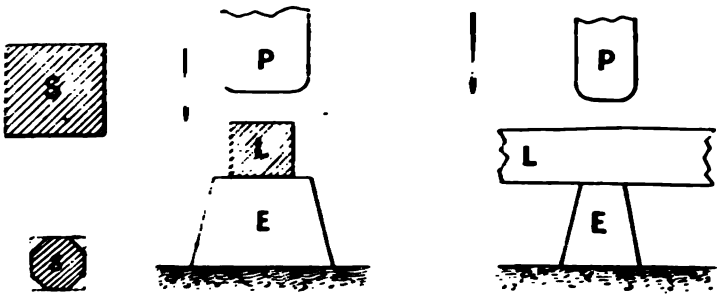


Fig. 112 et 113. — Etirage.

P, panne du pilon. — *E*, enclume. — *L*, lingot. — *S*, section initiale. — *s*, section finale.

de section et par suite l'étirage du lingot ; la densité ne changeant pas à cette température de travail, comme on le verra.

Le martelage s'effectue sur *enclume et panne* plates de peu de largeur,

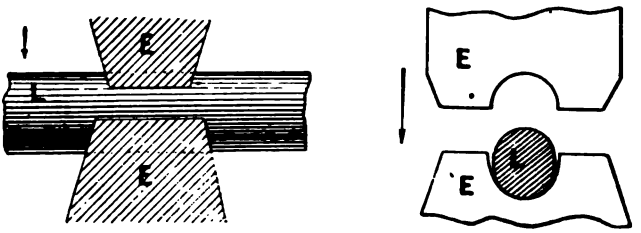


Fig. 114 et 115. — Etampage.

E, étampes. — *L*, lingot.

de façon que le travail du marteau soit réparti sur une petite surface et produise une grande déformation dans la pièce qui le subit.

Le lingot est à section carrée ou polygonale ; si elle est carrée, on

termine le martelage en abattant les arêtes de sorte que la section, à la fin de l'opération, soit octogonale.

Dans certaines usines on se sert d'enclumes et même de pannes en forme de V ; on peut alors forger rond immédiatement. Si le lingot est à section circulaire, il est clair que le forgeage rond s'impose dès le début.

b) *L'étampage est la phase finale du forgeage* qui succède à celle des grandes déformations. On se propose uniquement de donner à la pièce martelée une forme plus géométrique en régularisant sa section. Pendant cette opération, les déformations n'étant guère que superficielles, on n'a pas besoin de chauffer la pièce à température aussi élevée que dans le cas précédent, on s'en tient au rouge cerise naissant

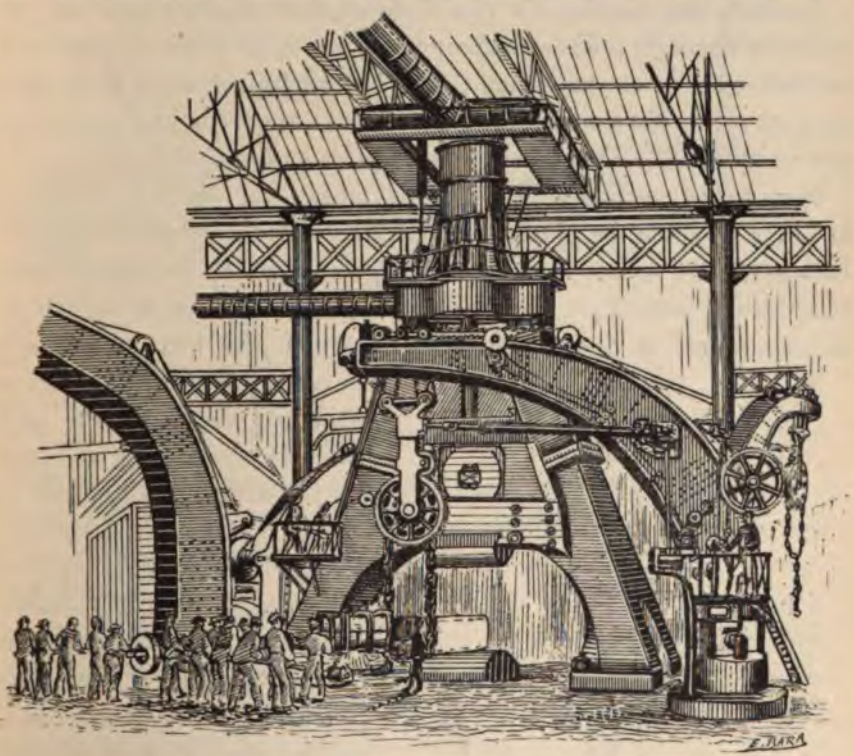


Fig. 116. — Forgeage d'un lingot au pilon de 100 tonnes (Usines du Creusot).

et même au rouge sombre avancé. L'étampage s'obtient avec enclume et panne qui sont, selon le cas, cylindriques ou tronconiques, ou à section déterminée, et à assez grande largeur ; l'enclume et la panne ainsi

choisies pour donner à la pièce brute de forge une section régulière prennent le nom d'*étampes*.

c) Des chaudes. — Le forgeage devant s'effectuer à haute température et le lingot exposé à l'air pendant cette opération se refroidissant assez rapidement, extérieurement du moins, on ne chauffe que la partie du lingot qu'on a le temps de forger avant que l'abaissement de température force à un réchauffage. On conçoit donc que le forgeage exige *plusieurs chaudes*.

On appelle *chaude*, l'ensemble des opérations qui consistent à porter la pièce à la température nécessaire au travail, à la manœuvrer, à la forger jusqu'à ce que sa température soit trop basse pour que le travail s'effectue dans de bonnes conditions.

La durée des chaudes n'a rien d'absolu, leur nombre varie avec le poids du lingot, le poids et la hauteur de chute du pilon et aussi avec les habitudes de chaque usine. Quand la température de la pièce soumise *au martelage* s'abaisse aux environs du rouge sombre avancé, on interrompt l'opération et on reporte la pièce au four à réchauffer.

Pour l'*étampage* il n'en est plus de même, car on y modifie peu la forme générale des pièces; aussi peut-on le continuer jusqu'à ce que la température se soit abaissée au rouge sombre. Ce forgeage à basse température permet de durcir, d'*écrouir*, comme on dit, la surface de la pièce forgée et de la rendre plus propre et plus nette. On a soin du reste, pour obtenir ce résultat d'une façon encore plus complète, de projeter de l'eau sur la partie de la pièce où va frapper le pilon : cette eau en se décomposant brusquement, nettoie la surface et fait tomber la pellicule d'oxydes qui, sans cette précaution, y resteraient attachés. C'est le maître forgeron qui, en s'abritant derrière les jambages du pilon, projette cette eau à l'aide d'une cuillère.

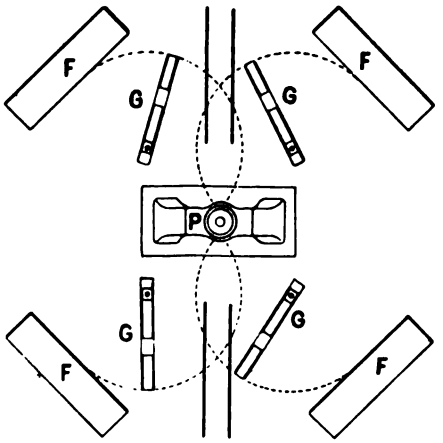


Fig. 117.

d) Installation d'un pilon. — L'installation d'ensemble pour le forgeage des grosses pièces comprend le pilon P entouré de fours à gaz

ou à grille F et desservi par des grues G qui permettent de transporter la pièce du four au pilon et réciproquement. Les grues doivent permettre de déplacer la pièce d'une manière quelconque dans l'espace, soit pour la transporter, soit pour présenter l'un quelconque de ses points à la panne du pilon.

La pièce est supportée à cet effet par une forte chaîne suspendue à la grue, elle est guidée dans ses mouvements par une équipe d'hommes attelés à une longue barre de manœuvre en fer, armée de leviers transversaux.

Cette barre de manœuvre *b* est liée par des frettes *g* à l'extrémité préalablement étirée *g* du lingot corrrespondant à la masselotte et à laquelle on donne le nom de *queue de griffage*.

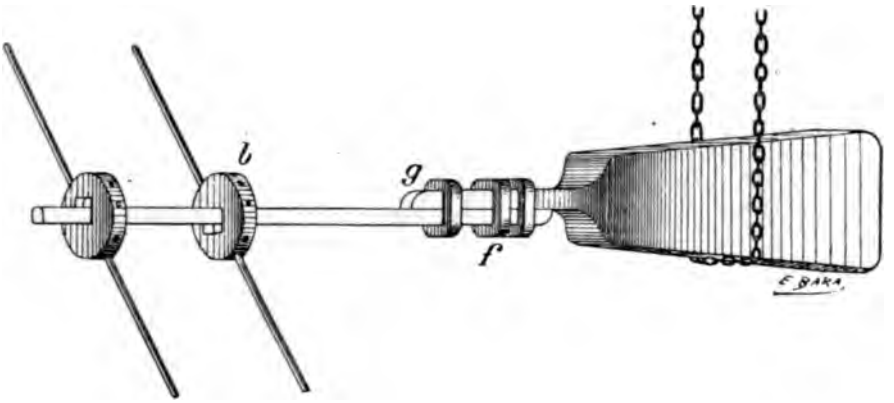


Fig. 118. — Queue de griffage et barre de manœuvre.

Dans certaines usines, on simplifie la manœuvre des pièces en les soutenant sur la plate-forme supérieure d'un chariot qui peut leur donner, au moyen de transmissions hydrauliques, tous les mouvements désirables; on fait ainsi une notable économie de main-d'œuvre, car la pièce étant toujours en équilibre sur le chariot pendant ses mouvements, il suffit d'une équipe de quatre à cinq hommes à l'extrémité de la barre de manœuvre, tandis qu'il en faut souvent quinze à trente lorsqu'un gros lingot est porté par une grue.

e) — ***Précautions diverses à prendre.*** — Enfin dans le cours du pilonnage, on aura dû exécuter les diverses chutes du bas et du haut, buriner à chaud les criques qui auront apparu à l'aide de tranches ou de gouges à chaud, etc...

Il y a une précaution que nous ne pouvons passer sous silence, c'est

celle qui consiste à réchauffer par un léger feu de coke ou de charl enflammés les queues de griffage servant à la manœuvre pour é que les vibrations qu'elles éprouvent n'amènent leur rupture. S'i

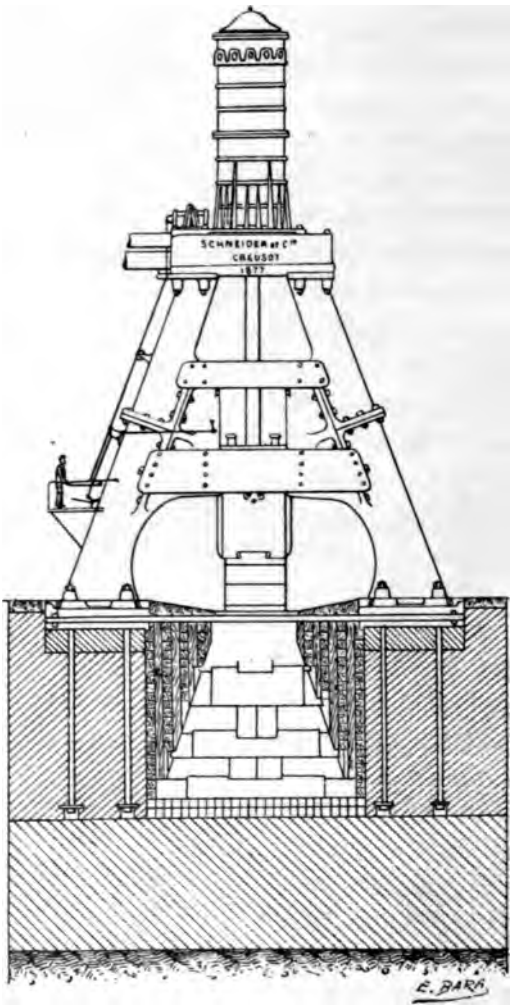


Fig. 119. — Marteau à vapeur de 100 tonnes (Creusot).

vrai que vers 300° l'acier devient fragile, il est acquis *que vers 10 fragilité de l'acier disparaît*. Et puisque nous avons occasion de p incidemment de la fragilité de l'acier à diverses températures, complétons ce qui précède en disant que si l'acier, au lieu d'être mis à des efforts lents, est soumis à des efforts rapides, à des c

par exemple, la température de fragilité s'élève et de 300 à 350° peut arriver jusqu'à 500°.

Voilà déjà un premier motif pour fixer au moins à 600° la température de travail de l'acier au pilon : dans le travail à la presse, il est

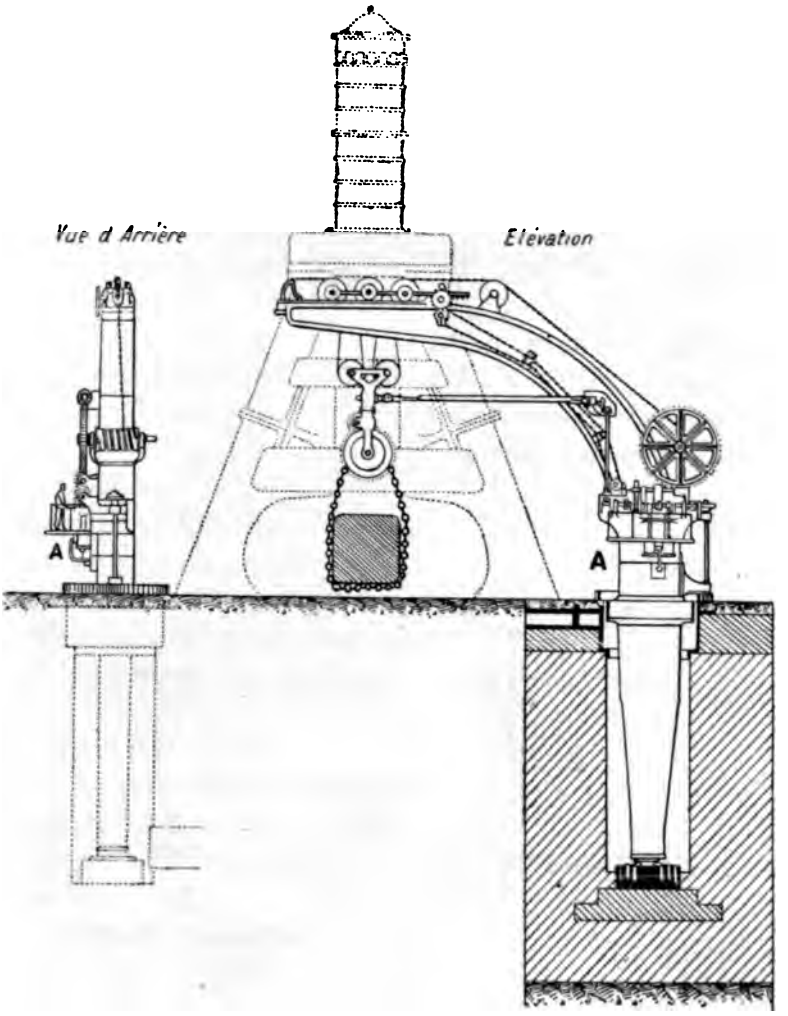


Fig. 120. — Grue à vapeur de 160 tonnes pour le marteau de 100 tonnes.

rationnel de supposer, vu la lenteur de l'effort, qu'on peut sans danger continuer à travailler un peu au-dessus de cette température car, à partir de 450 à 500°, les essais mécaniques divers, dont nous parlerons plus tard, indiquent déjà une ductilité considérable.

II. — *Forgeage sur mandrin pour pièces forées.* — Le forgeage des pièces longues, ci-dessus décrit, a été critiqué : on a dit, avec raison, que, puisque le forgeage avait non seulement pour but de façonner le lingot, mais encore d'améliorer le métal, cette amélioration ne pouvait être suffisamment efficace dans les régions axiales des pièces. Cette remarque visait surtout les pièces destinées à résister à de grands efforts : tubes de canons, frettes, réservoirs à air comprimé, arbres creux, etc... A cela on a répondu que l'inconvénient était moins grave qu'il ne paraissait de prime abord, puisque le métal central médiocrement forgé disparaissait au forage. Il n'en était pas moins avéré que le métal de la surface intérieure des pièces forées ne pouvait être, en tous points, comparable à celui de leur surface extérieure.

De là, l'idée du *forgeage sur mandrin* d'une pratique courante aujourd'hui dans toutes les usines.

Un lingot est coulé à la façon ordinaire, généralement dégrossi au pilon, c'est-à-dire soumis à un léger corroyage lui donnant une section polygonale à angles arrondis ou circulaire, puis affranchi de ses chutes à ses deux extrémités. Soumis à un réchauffage au rouge cerise clair, ce lingot est poinçonné par le passage d'un certain nombre de poinçons en acier placés les uns au-dessus des autres suivant son axe ; le trou pratiqué pouvant ensuite être régularisé ou agrandi par le passage de poinçons de plus fort diamètre.

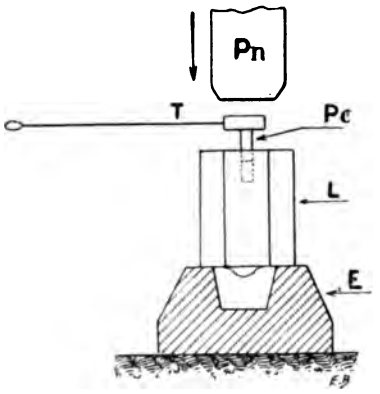


Fig. 121.

Pn, panne. — *T*, tas. — *E*, enclume. — *L*, lingot dégrossi. — *Pc*, poinçon.

Souvent on préfère ne pas soumettre le lingot brut de démoulage à un travail de dégrossissage au pilon par forgeage ordinaire; on burine d'abord, comme de coutume, la surface extérieure du lingot pour faire disparaître toute trace de criques, puis on l'envoie aux ateliers d'ajustage où l'on pratique à froid les diverses chutes à l'aide d'une mortaiseuse, puis le trou central à l'aide d'une machine à percer. Cela fait, le lingot est prêt pour le forgeage sur mandrin.

Il est difficile de dire quelle est la meilleure façon de procéder au

poinçonnage : théoriquement, c'est la première, car le travail à chaud est généralement plus économique que le travail à froid, mais une usine peut avoir ses pilons surchargés de besogne et ses machines-outils disponibles : tout dépendra des conditions du moment. Par le travail à froid on pourra juger de la compacité du métal, de son homogénéité à la façon dont se détache le copeau, etc...

Quoi qu'il en soit, le lingot dégrossi ou non étant percé à un diamètre convenable, on le chauffe au rouge cerise clair, puis quand il est arrivé à la température de forgeage, on l'enfile sur un mandrin en fonte, en

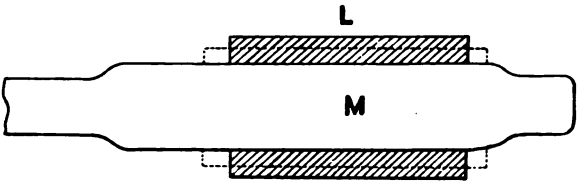


Fig. 122.

L, lingot. — *M*, mandrin.

acier le plus souvent aujourd'hui, et on le porte au pilon entre deux étampes demi-circulaires. Sous le choc du pilon, le diamètre intérieur restant constant à cause du mandrin qui s'oppose à son rétrécissement, le métal des couches périphériques s'écoule vers l'axe, le tube diminuant de diamètre extérieur. La réaction du mandrin s'exerçant en même temps sur les couches internes, le pétrissage du métal peut être considéré comme parfait. Le mandrin légèrement conique s'enlève très aisément à la fin de la chaude ; s'il y a difficulté, on le chasse par le choc de masses en fer ou encore à l'aide d'un appareil hydraulique. On procède alors à un nouveau réchauffage et ainsi de suite.

Certaines usines ont essayé, au lieu de partir d'un lingot, de fabriquer un cylindre creux obtenu par voie de moulage en sable ; on a ainsi du premier coup un tube prêt, après réchauffage, à être forgé sur mandrin. Reste à savoir si les frais de confection du modèle et du moule n'équivalent pas aux frais de dégrossissage et du forage des méthodes précédentes. D'un autre côté, les aciers coulés sans soufflures, à moins qu'ils n'aient été obtenus exclusivement par l'aluminium, sont toujours plus ou moins siliceux et peuvent ne pas supporter, sans être criqués, un travail de forge aussi énergique.

Pour des pièces sérielles, et d'assez grande longueur, un même lingot, soit brut de forge, soit généralement après dégrossissage, peut être divisé à chaud ou à froid, en plusieurs tronçons, chaque tronçon étant soumis au forgeage sur mandrin.

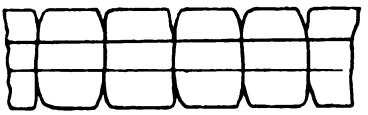


Fig. 123.

Quand la longueur est relativement faible par rapport au diamètre : bandages de roues de chemins de fer, frettes de petits et de moyens calibres, on a recours, après poinçonnage, à un forgeage s'appliquant d'une façon générale à toutes les pièces ayant la forme en anneau et qu'on appelle le bigornage.

III. — *Forgeage des pièces en forme d'anneau.* — Ces pièces peuvent être prises dans un lingot dégrossi et tronçonné, chaque tronçon devant fournir après forgeage une de ces pièces : c'est le cas des frettes.

Pour des fabrications exigeant moins de garanties, on peut couler un lingot pour chaque pièce : c'est le cas des bandages de roues de chemins de fer. Or, ce procédé est alors très pratique, car vu la masse assez faible d'acier *relativement dur* à couler pour avoir le métal nécessaire pour un bandage, la retassure est presque négligeable : elle disparaîtra, du reste, complètement à l'opération du poinçonnage.

Que l'on ait un tronçon provenant d'un lingot déjà dégrossi ou un petit lingot spécial (*bonbonne*) destiné à fournir une pièce en forme d'anneau, il faut réchauffer ce tronçon ou ce lingot spécial au rouge cerise clair et lui faire subir la série des opérations suivantes que nous énumérons rapidement sans tenir compte du nombre des chaudes variable avec les usines, les pilons employés, etc...

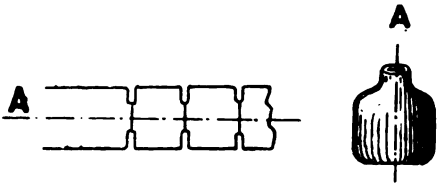


Fig. 124.
A, axe du lingot.

La première opération consiste à marteler le lingot de manière à réduire sa hauteur de moitié environ. On perce ensuite ce bloc à l'aide d'un poinçon fixé à la panne ou indépendant ; pour faire tomber la débouchure, on retourne le disque et on replace le poinçon sur l'autre face. Le poinçon laissé en place reçoit le choc du pilon un certain

nombre de fois, de façon à agrandir le trou qu'il a pratiqué ; on a le soin de jeter en même temps, à la surface du métal, du fraisil ou du menu charbon qui empêche le poinçon d'adhérer au lingot.

On peut continuer à agrandir le trou par le passage successif à chaud

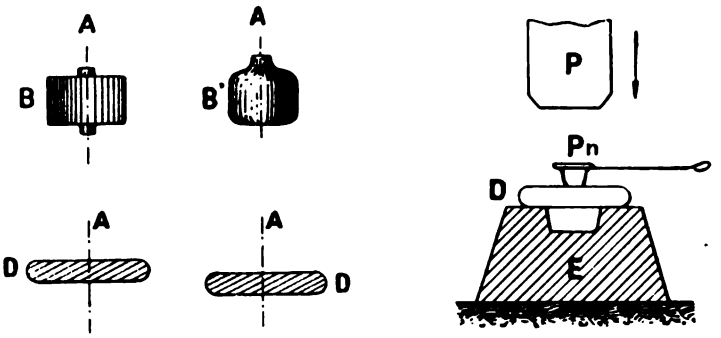


Fig. 125.

B, bloc d'acier. — *B'*, bombonne. — *D*, disque. — *A*, axe du lingot. — *P*, panne. — *E*, enclume. — *Pn*, poinçon.

de poinçons de diamètres croissants avant de passer au *bigornage ;* on procède ensuite à cette opération.

Le *bigornage* peut se faire *sur un mandrin* passé sans *frottement* à l'intérieur de l'anneau et reposant par ses deux extrémités sur deux chevalets ou uniquement *sur un tourillon* porté par l'enclume, appelé *bigorne :* l'anneau est placé sur cette bigorne et le marteau frappe sur

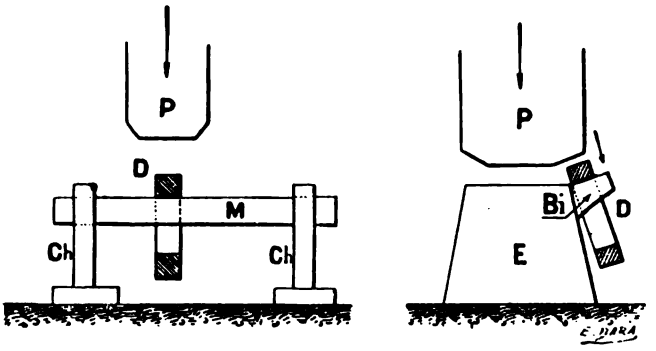


Fig. 126.

P, panne. — *D*, disque poinçonné. — *M*, mandrin, — *Ch*, chevalet. — *Bi*, bigorne. — *E*, enclume.

sa face extérieure par une facette ayant l'inclinaison du tourillon de l'enclume.

On fait tourner l'anneau avec un levier pour présenter les différe points de sa périphérie à l'action du pilon. En terminant, on po l'anneau sur l'enclume et, à l'aide de quelques coups de pilon, on redresse, car il a pu se gauchir.

La rondelle ou anneau au sortir de la bigorne est généralement aba donnée au refroidissement : on en profite pour enlever au burin l aspérités ou les défauts apparents sur la surface extérieure et pour vérifier le poids. Puis on procédera à son laminage dont nous diro plus tard quelques mots.

La fabrication que nous venons de décrire constitue un des rar exemples d'un forgeage exécuté en grande partie parallèlement à l'a du lingot.

IV. — *Forgeages divers : étirage* ou *emboutissage, étampage.* Ces forgeages spéciaux ne peuvent être étudiés avec détail que da les fabrications où on les utilise : nous nous bornerons à les défini

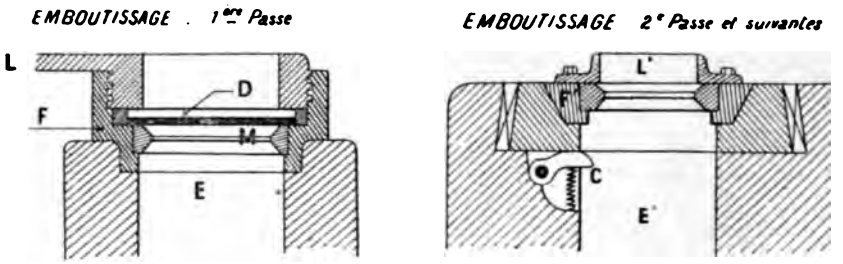


Fig. 127 et 128.

L, lunette à poignée empêchant les bords du disque de se relever avant la passe. *M*, matrice. — *F*, frette de la matrice. — *D*, disque à emboutir, chauffé au rouge cer clair. — *E*, enclume évidée. — *L'*, lunette guide de l'embouti avant la passe. — *F'*, fre de la matrice. — *E'*, enclume évidée. — *C*, crochet décollant l'embouti du poinçon lo que celui-ci se relève.

a) Cas de l'étirage. — Ce cas concerne la fabrication de toutes pièc affectant la forme d'un tube : quoique possible au pilon, ce forgea s'exécute surtout à la presse. La presse est en effet un appareil do l'action lente et progressive se prête mieux à un travail *régulier et in portant* de déformation, sans fatigue exagérée pour le métal qui en e l'objet.

Le métal arrive au pilon sous forme de disque circulaire découpé da une tôle d'acier provenant du laminage d'un lingot : ce disque chaut

au rouge cerise clair repose à plat au-dessus d'une matrice en fonte trempée ou en acier dur trempé ajustée sur l'enclume du pilon évidée à cet effet. Comme d'autre part, la panne du pilon est munie d'un poinçon également en métal très dur, on conçoit que si la matrice a un diamètre plus petit que celui du disque, l'abaissement du poinçon transformera ce disque en une sorte de cuvette ou d'embouti. Ce n'est que par des *passes successives* d'emboutissages à chaud qu'on arrive à donner à l'embouti une longueur suffisante.

Il ne faudrait pas croire que la fabrication des tubes ou emboutis se termine ainsi par des opérations à chaud ; il y a une série de passes ou d'étirages à froid ayant pour but non seulement d'amener d'une façon plus sûre les tubes à des diamètres plus précis, mais de leur donner aussi, quand besoin est, des propriétés mécaniques nouvelles susceptibles d'être acquises par le travail à froid dans des conditions que nous expliquerons.

Fig. 129.

b) *Cas de l'étampage.* — On appelle *étampes* des espèces de moules en acier trempé, ou en fonte trempée, ou même en fer aciéré, c'est-à-dire recouvert de mises d'acier dur par soudage, présentant en creux la forme de l'objet ou d'une portion de l'objet qu'on veut reproduire ou modifier par la forge.

Quelques exemples suffiront pour éclaircir la définition.

Un morceau de métal étant donné provenant d'une tôle, d'une barre déjà laminée ou forgée et en quantité légèrement supérieure à celle de la pièce à fabriquer on peut se proposer d'en tirer une pièce de forme et de dimensions déterminées en forçant ce métal porté au rouge cerise clair à épouser dans ses moindres détails la capacité réalisée par la juxtaposition de l'étampe fixée à l'enclume et de celle fixée à la panne du pilon.

Cette opération effectuée au pilon ou, selon les dimensions de l'objet, à une forgeuse (*américaine ou autre*), s'effectue généralement en plusieurs passes : les unes d'*ébauchage* donnant des modifications de plus en plus accentuées à la matière, les autres de *finissage* ou de véritable *matriçage* donnant, aux *bavures près* qu'on enlèvera à la lime ou mécaniquement, la forme de l'objet brut de forge.

La figure 130 donne l'exemple de l'étampage d'une pièce d'arme.

Ce forgeage se fait généralement à très haute température, quelquefois au jaune, car il importe que le métal ait la ductilité maximum

pour pouvoir remplir aisément le profil souvent compliqué des étampes.

L'étampage peut enfin ne s'exercer que sur une portion déterminée du métal ; nous citerons et pour mémoire seulement l'ogivage des tubes,

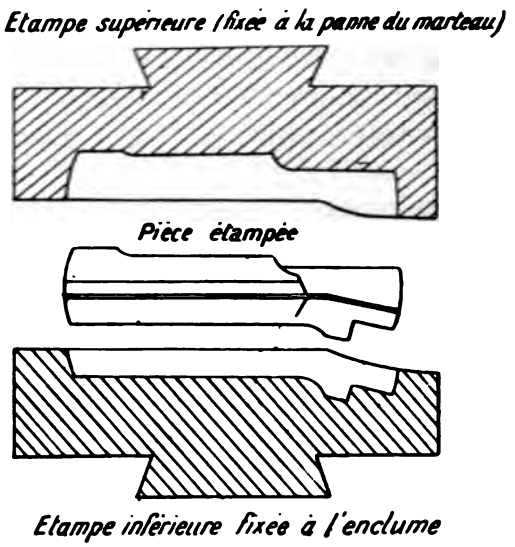


Fig. 130.

l'étampage des têtes de boulons et rivets, etc... Dans ce cas, on ne chauffe au rouge cerise clair que la portion du métal à déformer.

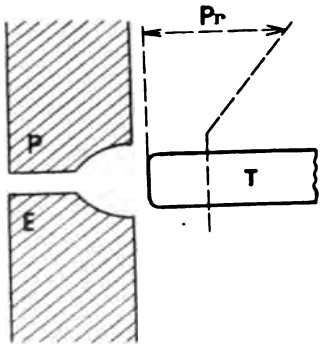


Fig. 131.

T, tube. — *Pr*, partie chauffée au rouge cerise clair. — *P*, panne du marteau. — *E*, enclume.

Pour les boulons et rivets on se sert plus spécialement des presses *dites à balancier* qu'il ne nous appartient pas de décrire.

Tels sont les cas généraux de forgeage au pilon qu'il importait d'exposer; il serait impossible de classer tous les dispositifs plus ou moins ingénieux imaginés dans les forges pour façonner les pièces ; une visite dans les ateliers suffira pour se rendre compte de l'usage des tranches à chaud, des jeux divers d'étampes, des tas placés en des points particuliers de l'enclume ou de la pièce pour la gauchir ou la déformer en telle ou telle région, etc...

V. — *Remarque sur les poids des marteaux des pilons.* — Si l'on veut arriver à de bons résultats pour le *forgeage sur pièces pleines*, on ne doit pas s'écarter de certaines limites pour le rapport adopté entre le poids du pilon et celui de la pièce.

Le forgeage avec un pilon trop léger n'intéresse que l'extérieur du lingot, il n'agit pas à cœur. La surface frappée par la panne du marteau et celle qui repose sur l'enclume, subissent des déformations plus grandes que le centre, les côtés verticaux deviennent concaves comme l'indique la figure 132.

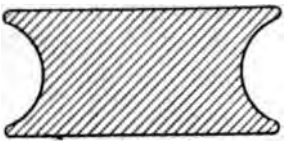


Fig. 132.

Au contraire, un pilon trop lourd produit un écrasement de toute la masse et le lingot devient renflé sur les côtés. Lorsque cet effet se produit sur un lingot insuffisamment chauffé, des glissements et des arrachements se constatent sur le centre de la pièce, notamment sur les points les plus faibles, c'est-à-dire suivant les diagonales du lingot primitif.

En donnant ensuite quartier à la pièce pour forger les faces renflées, le même phénomène se produit, et l'on a finalement une pièce gercée au centre suivant une croix.

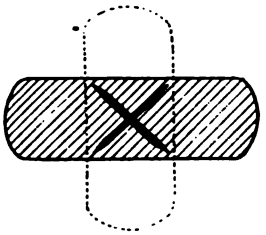


Fig. 133.

En général, avec les courses de piston adoptées dans la pratique, on admet que le poids du pilon doit être compris entre 2 et 3 fois celui de la pièce. Un lingot de 6 tonnes sera forgé convenablement avec un pilon de 12 à 15 tonnes ayant 2 m. 50 de course.

Cependant on ne peut suivre cette proportion pour les plus gros lingots, car on arriverait à des pilons dont l'installation serait trop coûteuse. C'est ainsi que les rares lingots de 100 tonnes qu'on a à travailler sont forgés avec un pilon de 100 tonnes, auquel on donne alors son maximum de course, 4 à 5 mètres.

II. — *Le forgeage à la presse*

A. — *Notions générales.* — Le principe de la presse hydraulique étant supposé connu, nous nous bornerons à quelques notions d'ordre général concernant la nomenclature des presses à forger.

Au point de vue de la nature du travail exécuté par les presses, on peut distinguer :

a) Les presses à matricer, en matrice ouverte ou fermée, exécutant un travail d'étirage ou d'étampage dont nous avons précédemment donné une idée à propos du forgeage au pilon et sur lequel nous ne reviendrons pas.

b) Les presses à forger exécutant un travail analogue à celui du pilon avec enclume et panne, non par une action de choc mais par une pression lente et progressive.

Nous nous occuperons exclusivement de ces derniers appareils, les précédents n'en différant que par des dispositifs de détail dans leur organisation générale ou par l'emploi de poinçons, contre-poinçons ou matrices à l'étude desquels nous ne pouvons nous livrer ici.

La partie la plus importante de la presse est son cylindre, communément appelé « *pot* », dans lequel se meut le piston portant l'outil de forgeage qui est une panne de forme variable.

Les pots de presse sont en fonte ou en acier consolidés ou non par des chemises d'acier les enveloppant à frottement dur et situés le plus ordinairement au-dessus de la pièce à forger : les pistons qui s'y meuvent travaillent comme ceux des marteaux-pilons à double effet, le travail du forgeage correspondant au poids du piston augmenté de la pression de l'eau sur ce piston et le relèvement du piston s'effectuant par des dispositifs spéciaux dont il sera question plus loin.

L'ensemble des deux *sommiers* résistants, l'un supérieur, l'autre inférieur, réunis par de fortes colonnes formant tirant, constitue ce qu'on appelle « *la cage de la presse* ».

Les sommiers sont des poutres en fonte ou en acier (*forgé ou moulé*); le sommier inférieur sert d'enclume lorsque, ce qui est le cas à peu près général, le pot de presse est au-dessus de la pièce à forger.

Le sommier supérieur, sur lequel sont presque toujours ajoutés le ou les pots de presse, est fortement relié aux colonnes constituant la cage de l'appareil.

Quant à la distribution, il en sera question dans la classification rationnelle des presses à forger.

B. — *Etude des presses à forger.* — Nous analyserons dans ce qui va suivre un remarquable mémoire de M. *Ch. Dufour*, ingénieur civil des mines, sur cette importante question. Ce mémoire constitue une étude

synthétique apportant, à notre avis, une grande clarté sur une classification paraissant de prime abord fort difficile à faire.

Cette classification une fois établie, nous étudierons comparativement le forgeage à la presse et au marteau-pilon, en mettant également à contribution l'étude de M. *Ferdinand Gautier* sur le même sujet.

M. *Dufour* classe les presses en deux grandes classes, se subdivisant chacune en 2 catégories comme il suit :

I. — *Presses à course continue* (*que nous étudierons avec détails*)	1° *Avec accumulateur de haute pression.* 2° *Sans accumulateur de haute pression.*
II. — *Presses à course partielle* (*que nous signalerons seulement*) .	1° *A course partielle invariable* 2° *A course partielle variable.*

I. — *Presses à course continue*

1° — *Avec accumulateur de haute pression.* — Nous examinerons dans cette classe la presse avec accumulateur à poids de *Tannett Walker et Cie*, de *Leeds*. On en trouve un type aux usines *Saint-Jacques*, à Montluçon, d'une puissance de 4000 tonnes.

a) L'installation comprend d'abord :

— *Une machine à vapeur* à deux cylindres actionnant directement deux pompes de haute pression à piston différentiel.

— *Les pompes* refoulant l'eau au pot de la presse par l'intermédiaire d'un accumulateur de haute pression interposé sur la conduite.

— *L'accumulateur* emmagasinant l'eau refoulée par les pompes et restituant ce volume en quelques instants au moment du travail. Ainsi placé, cet appareil permet de munir la machine à vapeur d'un volant, puisque l'on n'est pas forcé d'arrêter brusquement la machine en même temps que la presse : la machine peut donc avoir une allure assez régulière. Comme les pompes refoulent l'eau, non seulement pendant les périodes de pression mais encore pendant les arrêts de la presse jusqu'à remplissage de l'accumulateur, leur débit et leurs dimensions sont moindres à vitesse et à puissance égales que s'il n'y avait pas d'accumulateur. Il en résultera que la machine à vapeur pourra être moins puissante.

b) L'installation comprend ensuite :

— *Une série de machines ou d'appareils* semblable à la première, com-

prenant une machine à deux cylindres actionnant les pompes de basse, pression et un accumulateur de basse pression.

Croquis schématique d'ensemble.

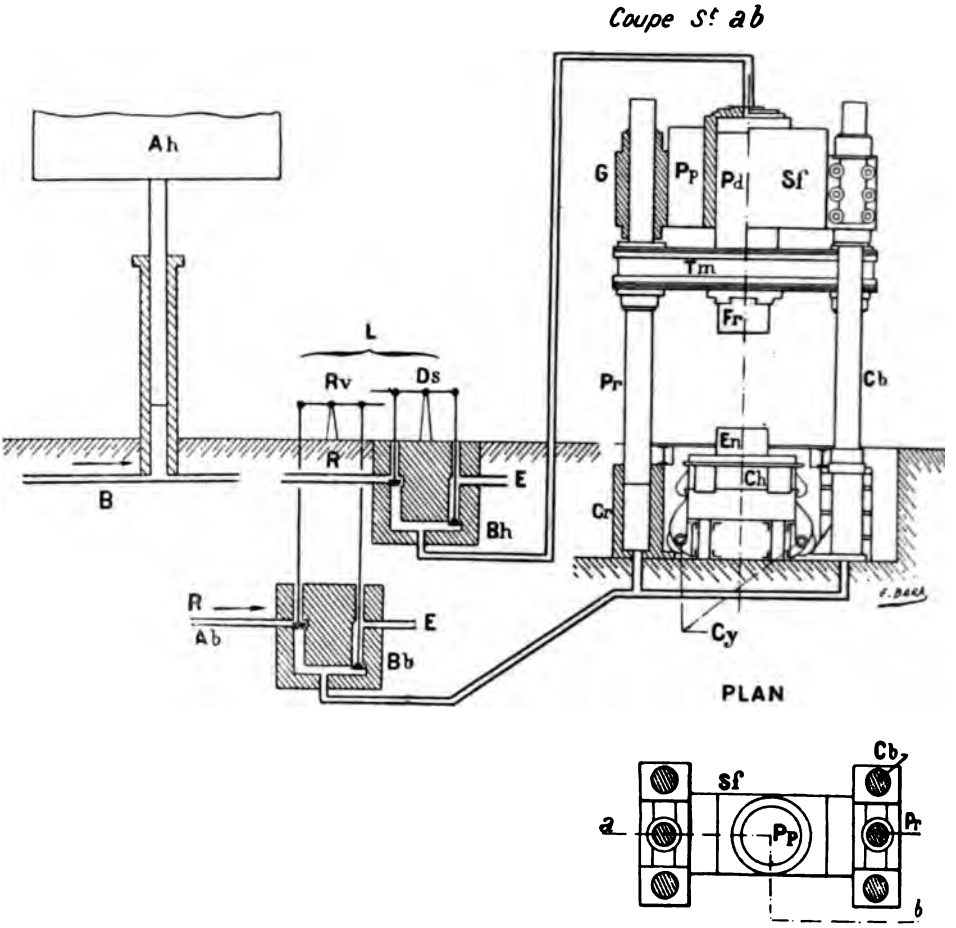


Fig. 134. — Presse hydraulique à forger (puissance : 4000 tonnes) système « Tannett-Walker ».

Ah, accumulateur à haute pression. — *B*, batterie de pompes à haute pression (mouvement de descente de la traverse mobile portant la frappe). — *R*, refoulement. — *E*, échappement. — *Bb*, boite à soupapes de basse pression. — *Ab*, accumulateur et batterie de pompe à basse pression (relevage de la traverse mobile). — *Rv*, basse pression : relevage. — *Ds*, haute pression : descente. — *L*, leviers de commande des soupapes pouvant agir simultanément. — *Bh*, boite à soupapes de haute pression. — *Pr*, piston de relevage. — *Cr*, cylindre de relevage. — *G*, guide du piston de relevage. — *Pp*, pot de presse. — *Pd*, piston de descente. — *Sf*, sommier supérieur fixe. — *Tm*, traverse mobile. — *Fr*, frappe. — *En*, enclume. — *Ch*, chabotte. — *Cb*, colonnes du bâti portant le sommier supérieur contenant le pot de presse (descente) et les guides des pistons releveurs et de la traverse mobile. — *Cy*, cylindres hydrauliques dont les pistons amènent ou enlèvent la chabotte.

— *La traverse porte-tas* est reliée par ses deux extrémités à deux *pistons releveurs* situés dans le plan médian vertical de la cage de presse et *inférieurement, ces pistons sont en communication constante* avec l'accumulateur à basse pression et relèvent le tas par de l'eau sous pression à 50 kilogr. par cmq. dès que le mécanicien a coupé la communication avec l'accumulateur à haute pression et ouvert l'échappement. Les cylindres des pistons releveurs sont fixés au sommier inférieur.

La nécessité de passer par l'intermédiaire de l'accumulateur de haute pression a pour conséquence de dépenser le travail maximum quelque faible que soit la résistance du lingot à forger, ce qui est loin d'être économique au point de vue de la consommation de vapeur, mais la vitesse avec laquelle le tas supérieur descend pendant le forgeage (*vitesse d'empreinte*) est relativement rapide et atteint en moyenne 1^m500 à la minute, soit 0^m030 par seconde.

Cependant, pour remédier à la dépense de vapeur en cours de forgeage, on a organisé dans la presse de *Montluçon* l'accumulateur de haute pression à trois puissances, correspondant à des pressions de 438, 219 et 146 kilogr. suivant qu'on marche à un, deux ou trois pistons.

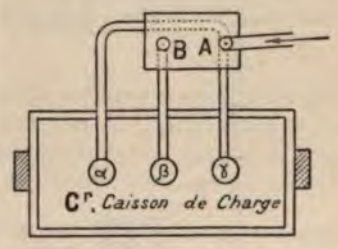


Fig. 135. — Accumulateur à trois puissances.

Et en effet C étant un caisson de charge reposant sur la tête des trois pistons α, β, γ qui plongent dans trois corps de pompe ; si les soupapes A et B sont ouvertes, l'eau refoulée pénètre sous les trois pistons ; la soupape A seule étant ouverte l'eau accède aux pistons α γ ; la soupape A étant fermée et B ouverte, il n'y a que le piston β qui reçoit l'eau des pompes. Par conséquent si P est le poids du caisson, Ω la section commune des plongeurs, l'on disposera suivant le cas des pressions : $\frac{P}{\Omega}$, $\frac{P}{2\Omega}$, $\frac{P}{3\Omega}$.

On peut citer parmi les presses *Tannett Walker* existantes le type décrit de 4000 tonnes (*Montluçon*), le type de 2000 tonnes (*Le Creusot*), celui de 1200 (*Aciéries anglaises de Barrow*) et celui de 600 tonnes (*Wittgenstein, à Vienne*).

Dans la même classe de presses il faudrait ranger la presse de 4000 tonnes de *Bochum*, fonctionnant avec des accumulateurs à air comprimé

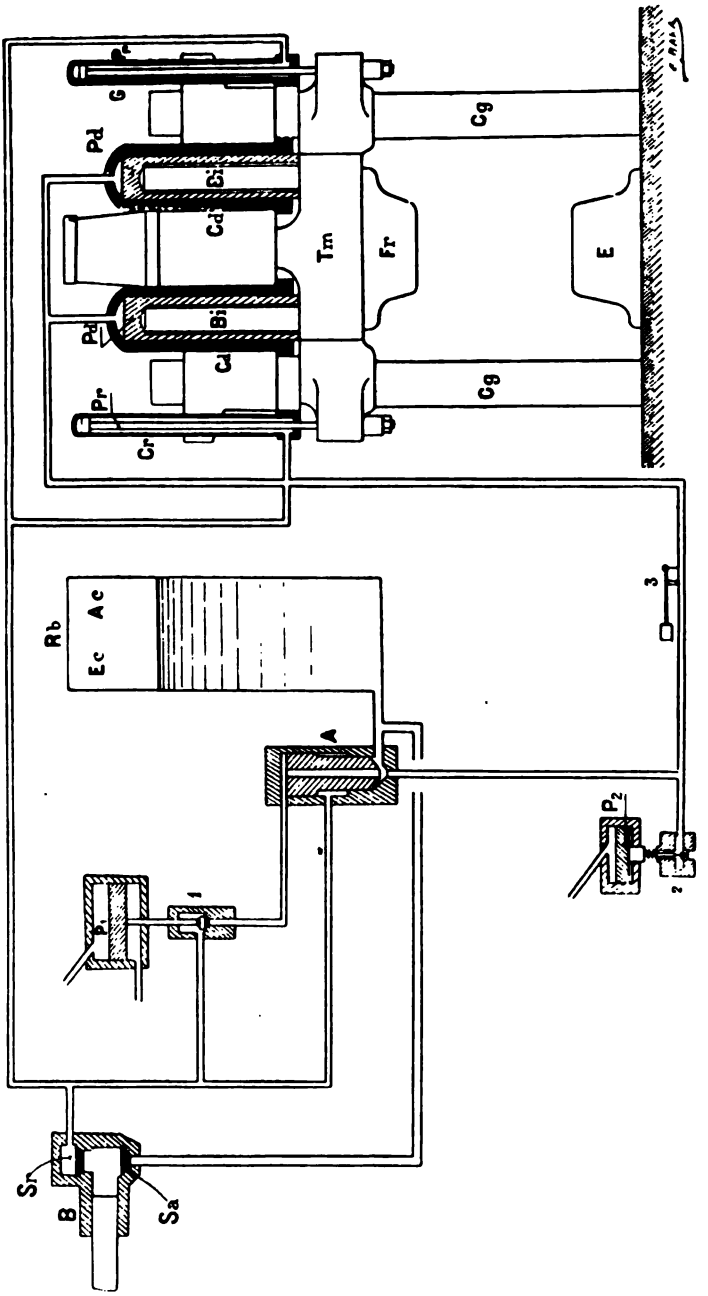


Fig. 136. — Presse hydraulique à forger, système « Davy » (puissance : 4.000 tonnes).
Croquis schématique d'ensemble.

LÉGENDES

Sr, soupape de refoulement. — *B*, batterie de trois pompes. — *Sa*, soupape d'aspiration. — *A*, soupape automatique. — P_1, P_2, pistons. — *Rb*, réservoir de basse pression. — *Ec*, *Ac*, eau et air comprimés. — *Cr*, cylindre pour le piston releveur. — *Pr*, piston releveur. — *Cd*, cylindre pour le piston de descente. — *Pd*, piston de descente, — *Bi*, bielle d'appui du piston sur la traverse. — *Tm*, traverse mobile. — *Fr*, frappe. — *Cg*, colonne guide. — *E*, enclume.

Manœuvre de la presse :

1° *Descente à blanc.* — La machine actionnant la batterie de pompes est au repos ; les pots de presse et de relevage communiquent avec le réservoir de basse pression par la soupape automatique *A* soulevée complètement et fermant par conséquent la conduite de refoulement en ouvrant la conduite venant directement du réservoir à basse pression ; les soupapes 1 et 2, ainsi que celles des pompes, reposent sur leurs sièges.

2° *Forgeage.* — La machine actionne les pompes qui refoulent l'eau dans les pots de presse et de relevage ; la soupape 1 se soulève ; la soupape automatique *A* s'abaisse à fond, l'eau de refoulement la traverse, et cette soupape ferme la communication avec le réservoir à basse pression.

3° *Relevage.* — Les pompes, continuant à fonctionner, refoulent l'eau dans les pots de relevage ; les pots de presse refoulent l'eau dans le réservoir à basse pression ; la soupape 1 est abaissée ; la soupape automatique *A* est levée à fond ; la soupape 2, soulevée, laisse aller une partie de l'eau dans une bâche où elle est reprise par les pompes.

4° *Arrêt.* — La machine et, par suite, les pompes sont au repos : l'eau des releveurs ne peut être évacuée.

Nota. — La soupape 3 est un appareil de sûreté ; elle ne se soulève qu'au cas où il se produit un excès de pression dans la conduite, soit dans un sens, soit dans l'autre. Les soupapes 1 et 2 sont levées ou abaissées par les pistons P_1 et P_2 commandés par un jeu d'eau réglé par des tiroirs que manœuvre le mécanicien.

et permettant d'éviter les coups de bélier si fréquents dans le type *Tannett Walker.*

Le piston de cette presse a deux diamètres : suivant que la pression s'exerce sur la partie supérieure, la section annulaire ou les deux à la fois, on obtient trois puissances différentes comme dans la presse de *Montluçon.*

2° — *Pas d'accumulateur de haute pression.* — La presse *Davy* caractérise cette catégorie.

L'installation comprend :

— *Une machine à vapeur* à deux cylindres à pleine introduction et sans *volant.*

— *Trois pompes horizontales* à piston plongeur, actionnées par un arbre à trois coudes qui est attaqué par la machine au moyen de deux manivelles. Comme il n'y a plus d'accumulateur, les pompes, à vitesse égale, doivent avoir un débit, et par suite, des dimensions plus grandes que dans la classe précédente.

L'allure de la machine est évidemment plus régulière, puisqu'il n'y a ni accumulateur, ni volant.

— *La presse proprement dite ;*

— *La distribution, la canalisation, le relevage,* etc...

L'installation est complétée par un réservoir d'eau à air comprimé dont la pression varie entre quatre et huit atmosphères et par une pompe à air et à eau qui l'alimente.

Le relevage se fait par l'eau à haute pression fournie par la machine.

Etudions d'abord la presse :

La presse proprement dite renferme deux *pots de presse* placés symétriquement par rapport à l'axe et dont les pistons reposent sur la traverse mobile par l'intermédiaire de deux bielles à extrémités sphériques. Cette traverse est guidée par quatre colliers embrassant les colonnes de la cage et, en outre, par une tige se déplaçant dans le sommier supérieur, entre les deux pots de presse. Le guidage de la presse est, comme on le voit, bien mieux assuré que dans le type *Tannett Walker ;* en outre, le mode d'attaque de la traverse mobile par des contacts sphériques permet aux pistons de conserver leur verticalité, même quand l'effort s'exerce tout à fait en dehors de l'axe de la presse.

La traverse est fixée aux pistons releveurs en communication constante avec les pompes et, par suite, avec l'eau à haute pression quand

la machine est en marche : les cylindres de ces pistons releveurs sont fixés au sommier supérieur.

L'eau à basse pression fournie par le réservoir d'air comprimé alimente les pompes et les pots de presse pendant la descente à blanc, qui se fait, par suite, sans dépense de vapeur. Enfin, cette eau sert à manœuvrer les soupapes de la distribution.

Passons maintenant au fonctionnement de la presse :

Fonctionnement de la presse : quatre mouvements à produire.

DESCENTE A BLANC	FORGEAGE	RELEVAGE	ARRÊT
La machine est au repos, les pots de presse et de relevage communiquent avec la basse pression.	Les pots de presse et le relevage communiquent avec l'eau refoulée par la machine en marche.	La machine marche et refoule l'eau dans les releveurs. L'eau des pots de presse est évacuée dans le réservoir de basse pression	La machine est au repos et l'eau des releveurs ne peut être évacuée.

La commande de la distribution et le fonctionnement des soupapes correspondantes s'obtiennent par la manœuvre d'un levier qui déplace un tiroir distribuant convenablement l'eau à basse pression. Cette eau agit sur des pistons qui ouvrent ou ferment les soupapes de la distribution.

L'admission de vapeur est commandée par le mécanicien de telle façon qu'il doit constamment agir sur un volant pour la maintenir ouverte ; la machine, dès qu'elle est fermée, tendant sans cesse à la refermer.

Il résulte de ce que la machine est sans volant et de ce que l'ouverture de la soupape d'admission de vapeur varie à chaque instant, suivant que l'une des actions l'emporte sur l'autre, que la machine a des variations de vitesse considérables, variations fatiguant forcément ses organes et influençant défavorablement la dépense de vapeur.

Malgré la remarquable conception des divers mécanismes de cet appareil, il faut signaler cependant l'inconvénient résultant de la multiplicité et de la complexité de certaines soupapes qui, sous diverses causes, peuvent irrégulièrement fonctionner.

La vitesse d'empreinte atteint, avec ce système, 70 à 75 cm. par minute.

Parmi les types existant en *France*, il faut citer la presse de 2000 tonnes des Aciéries et forges d'*Unieux* (Loire), à MM. *Jacob Holtzer et Cie* et la presse de 4000 tonnes des Aciéries de la marine, à *Saint-Chamond* (Loire).

II. — *Presses à course partielle.*

Dans les presses à course continue que nous venons de décrire, les appareils de refoulement envoient l'eau à la presse d'une façon ininterrompue pendant le forgeage, de sorte que le piston compresseur peut descendre plus ou moins régulièrement mais sans arrêt, exerçant son action sur le lingot de toute la hauteur de la course totale; ce qui, théoriquement, permettrait de réduire aux plus faibles dimensions, et cela d'un seul coup, le plus gros lingot.

Il en est tout autrement, bien entendu, dans la pratique elle-même.

Dans les presses à course partielle, la pression n'est produite que pendant une course qui n'est qu'une fraction de la course totale.

On distingue parmi ces presses celles *à course partielle invariable* dont le type est représenté par la presse d'*Allen* ou de *Galloway* et celles à *course partielle variable*, dont le type est représenté par la presse *Breuer Schumacher et Cie*.

Il est inutile, d'après les descriptions assez détaillées que nous avons données des *types les plus importants* de presses à forger à *course continue*, de poursuivre une étude plus approfondie de ces divers appareils: l'essentiel pour nous était de nous rendre compte du fonctionnement général des divers organes qu'on rencontre ordinairement dans la plupart de ces engins mécaniques; ces derniers, à course partielle, étant les moins répandus.

C. — *Forgeage comparé au marteau-pilon et à la presse.* — Le marteau-pilon et la presse, agissant l'un par choc, l'autre par pression progressive, il est intéressant de rechercher quelle est la différence entre les effets que ces appareils produisent sur le métal. Les expériences faites sur ce sujet dans les usines ne sont encore ni assez générales, ni assez concluantes : tout ce qu'on peut affirmer c'est qu'en *France* où le marteau-pilon a été jusqu'à ces dernières années l'instrument de forgeage

par excellence, les aciers travaillés avec cet appareil ne l'ont cédé en rien comme qualité à ceux qu'en *Angleterre* on travaillait, au contraire plus spécialement avec la presse, engin répandu depuis longtemps chez nos voisins.

Il ressortira toutefois des considérations qui suivent que de nombreux avantages, au moins pour l'économie d'installation et d'emploi, paraissent acquis à la presse. Or, ce point de vue, en admettant qualité égale pour les produits obtenus, suffirait pour expliquer comment cet appareil presque méconnu chez nous il y a quelques années, sinon pour les travaux de mandrinage, emboutissage, etc... au moins pour les gros travaux de forge, est à peu près établi partout à côté du pilon dans nos grandes usines, lui faisant souvent une très grande concurrence et l'ayant déjà supplanté pour un grand nombre de travaux.

I. — *Travaux exécutés à la presse.*

Nous ne pouvons donner à ce sujet qu'une assez rapide énumération, car la description du travail exécuté au pilon pourrait être reproduite ici en grande partie.

Le pilon agit par choc, la presse par pression lente : les déformations accomplies par ces engins donnent une idée toute différente de la ductilité du métal aux hautes températures du forgeage. Le travail à la presse se traduisant plutôt par un écoulement facile de l'acier, à l'instar d'une matière plastique, il est rationnel de penser que cet appareil sera supérieur au pilon pour les opérations *d'emboutissage et d'étampage ;* et de fait le métal y court moins de risques de déchirures, tout en y subissant une déformation plus grande et plus régulière.

Quant au *forgeage* proprement dit, il se fait très bien à la presse, il y est rapide et peut être beaucoup plus précis qu'avec le pilon : l'*étirage* y est particulièrement facile ; il a fallu peu de temps à nos usines pour bien exécuter le *finissage*.

Il y a en effet un apprentissage à faire, surtout au point de vue de la profondeur à admettre pour les empreintes de la première chaude et la loi de leur décroissance aux chaudes suivantes si l'on ne veut s'exposer à avoir en fin de travail un lingot rapidement forgé mais rempli de gerçures. S'il est vrai qu'aux ateliers de *Whitworth* presque tout le travail de grosse forge et notamment le travail pour la marine (arbres coudés, droits, etc.) se fait à la presse, nous pouvons en dire autant

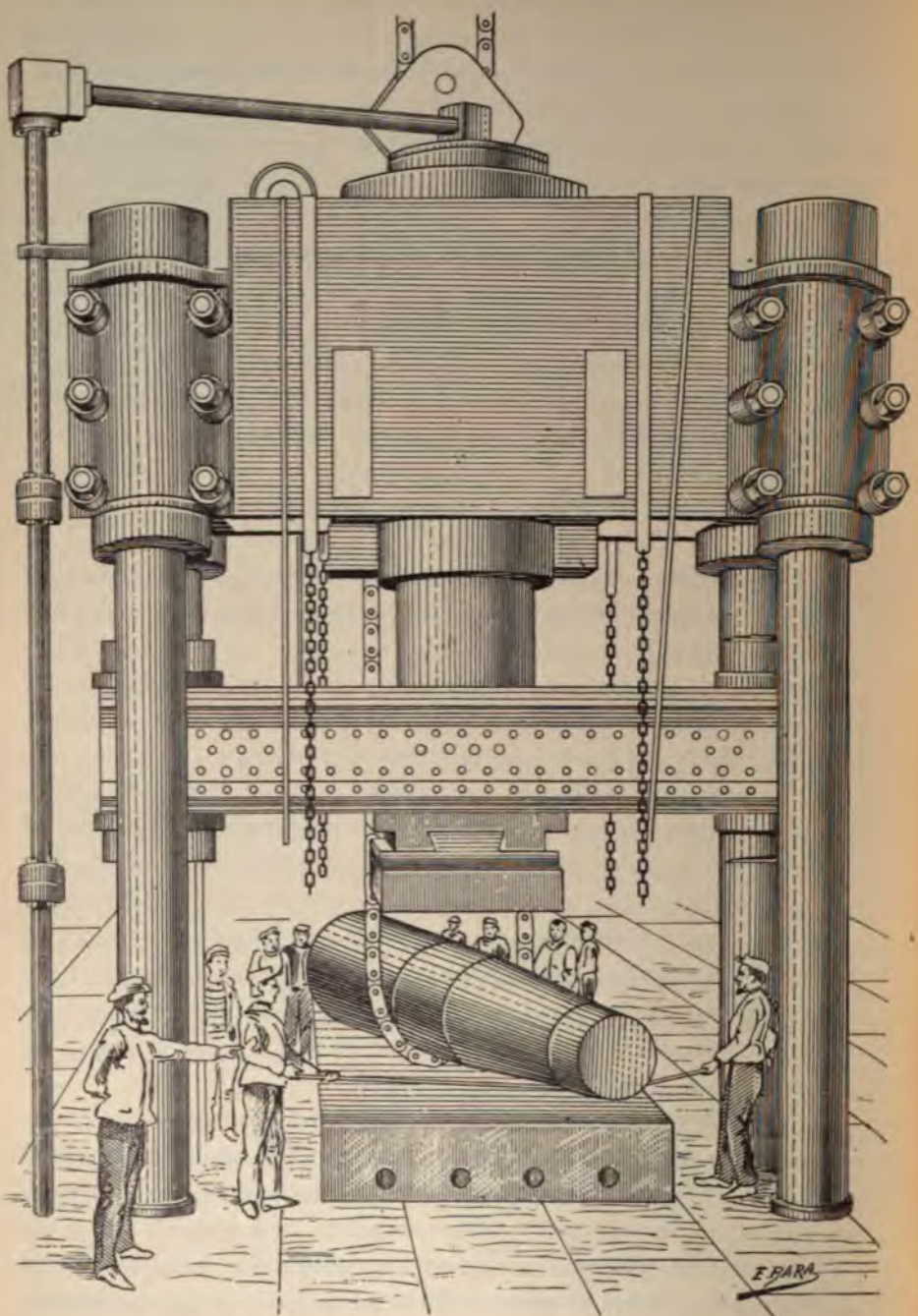


Fig. 137. — Presse à forger de 4,000 tonnes.

aujourd'hui pour un certain nombre d'usines françaises (Unieux, chez Jacob Holtzer et Cie, etc., etc...).

Il reste entendu que nous n'attribuerons pour l'instant aucun caractère de supériorité au travail de la presse pour ce qui concerne *la qualité du métal* élaboré : nous constatons simplement l'aptitude de l'engin au travail de façonnage.

Il est enfin une opération pour laquelle la presse paraît absolument convenir, c'est celle du *gabariage*, opération consistant à modifier progressivement et par action lente la surface d'une pièce déjà forgée de façon à lui donner aussi rigoureusement que possible, au travail d'usinage près, la courbure voulue en tous ses points.

La pièce devant être gabariée (tôles, plaques de blindage, etc..) est portée au rouge à peine sensible et conduite à la presse munie pour ce travail d'une panne et d'une enclume appropriées à chaque cas. Des coins, tasseaux, etc... placés sous la pièce en des points déterminés de l'enclume, ou entre la pièce et la panne, serviront à gauchir la surface quand on donnera la pression. Toute presse à forger pourra servir au *gabariage* pourvu que l'écartement des jambages soit suffisant pour la manœuvre des pièces qui, comme les tôles et les plaques de blindage, ont deux dimensions très grandes. Dans les grandes forges, on spécialise généralement les presses suivant le travail qu'elles ont à faire et on règle en conséquence leur construction et leur puissance.

II. — *Mise en parallèle des deux appareils.*

Il faut à un pilon *une chabotte* de très grand poids ; celle du *Creusot* pèse 720 tonnes ; celle des Aciéries de *Terni* (Italie) pèse 998 tonnes. La presse n'a pas besoin de chabotte, son action s'exerce tout entière entre des parties rigides solidement reliées entre elles : ses fondations sont insignifiantes.

L'avantage de la presse ne fera que s'accentuer dès qu'on voudra augmenter la puissance du forgeage. Que pourraient être les fondations d'un pilon de 150 tonnes par exemple et leur prix de revient ? Cette difficulté n'existe pas pour la presse.

L'effet utile du pilon n'est jamais qu'une fraction de l'effet théorique par suite de l'élasticité de la chabotte. Dans la presse, au con-

traire, l'effort du piston du pot de presse est intégralement transmis au lingot.

L'emploi de la presse ne donne pas lieu à ces énormes vibrations qui, avec le marteau pilon, ébranlent les constructions voisines, dérangent l'établissement des machines-outils, etc..... Enfin il n'y a pas à craindre de déplacement de la base.

Le métal se déformant beaucoup plus aisément à la presse (*tout se passe comme si l'acier paraissait plus ductile*), on pourra travailler les lingots plus froids et par suite diminuer le nombre des chaudes. MM. *F. Gautier* et *Demenge* estiment que le nombre des chaudes à la presse est réduit de moitié et la durée du travail des 4/5. Il en résulterait qu'on ferait cinq fois plus de travail dans le même temps à la presse qu'au pilon.

M. *Dufour* cite l'exemple suivant :

Avec une presse de 2000 tonnes, on a forgé un lingot octogonal de 900 mm. (diamètre inscrit) et 1200 mm. de longueur et on l'a ramené en une seule chaude en 40 à 50 minutes au plus, à la dimension carrée de 350 mm. Pour obtenir le même résultat avec un pilon de 50 à 60 tonnes, il eût fallu deux chaudes et deux périodes de travail de une heure chacune.

Le nombre des chaudes serait réduit de moitié et la durée du travail dans le rapport de 12 à 5 qui vaut à peu près 2,5. Or, il est admis comme règle générale par les praticiens anglais que l'on fait 2 fois 1/2 plus de travail à la presse qu'au pilon dans le même temps. L'exemple cité par M. *Dufour* est donc susceptible de fournir un renseignement sérieux.

Faisant abstraction de la durée moins grande du travail pour un même corroyage et ne considérant que la réduction du nombre des chaudes, nous voyons combien il est avantageux de travailler à la presse au point de vue même de la qualité du métal. Les chauffages répétés font courir à l'acier des risques dangereux au sujet de l'état de son grain qui tend de plus en plus à devenir cristallin et comme, en outre, l'acier peut être porté à une température un peu moins élevée on se mettra d'autant mieux en garde contre un « *acier brûlé* », c'est-à-dire à grain cristallin et oxydé.

Il en résulte que la presse est un outil à grand débit, produisant plus que le pilon dans les moments d'activité industrielle et donnant pour le forgeage un prix de revient moins élevé.

Il faut aussi tenir compte de la dépense de vapeur : d'après M. *Daelen*, à dépense de vapeur égale, la presse produirait le double du marteau-pilon, indépendamment de la question de rapidité.

Le nombre des coups à la minute est fort variable d'une presse à l'autre, il varie de 10 à 30 environ et est considéré pour l'instant comme très satisfaisant, étant donnée la lenteur relative des engins servant à manœuvrer les lingots : grues, ponts roulants, etc...

Pour avoir toutefois des résultats comparables au point de vue du prix de revient des deux forgeages, il faudrait que les essais fussent faits par une usine ayant une presse et un pilon équivalents : nous allons voir comment, très rationnellement du reste, M. *Dufour* cherche à donner une idée de cette équivalence.

III. — *Equivalence d'une presse* et *d'un pilon.*

Il paraît difficile d'établir un rapport quelconque entre le travail utilement dépensé dans le forgeage au pilon et celui dépensé dans le forgeage à la presse. Ces deux appareils agissent bien différemment, et l'action de choc exercée par l'un d'eux ne *peut être analysée rigoureusement.*

Laissant de côté toute considération théorique relative à l'équivalence de ces engins, on peut se proposer de rechercher quelle est la puissance que doit avoir une presse pour les travaux à exécuter.

« *Et d'abord, il est établi par l'expérience qu'il faut, en forgeage* « *normal, compter sur une pression de 800 à 1000 kil. par centimètre* « *carré du lingot : admettons 800 kil.* »

Si on suppose que l'on veuille ébaucher des lingots octogonaux de 1 mètre (diamètre inscrit) et qu'on veuille les amener à une dimension carrée quelconque, en forgeant sur 4 faces seulement, la plus grande largeur pressée sera obtenue quand on atteindra le premier carré qui a environ 70 cm. de côté. Si on se donne alors une largeur de panne de 35 cm. par exemple, on déduira la surface maximum pressée : $70 \times 35 = 2450$ cm².

Or d'après ce qu'on sait pour la valeur de la pression par cm² du lingot en forgeage normal, on aura pour la presse : 2450×800, soit environ 2000 tonnes.

Si au lieu de forger sur quatre faces seulement, on voulait forger sur les huit faces successivement, la surface pressée ne dépasserait jamais,

avec un lingot de 1 mètre de diamètre inscrit et un tas de 35 cm. comme plus haut : $42 \times 35 = 1470$ cmq.; d'où une presse de $1470 \times 800 = 1200$ tonnes.

IV. — *Valeur des deux forgeages.*

Pour les métaux misés, tels que le fer et l'acier puddlés, il semble que la presse ne puisse convenir, car pour la loupe comme pour les paquets successifs, il faut toujours avec des degrés divers expulser les silicates semi-fluides constituant les scories et interposés dans la masse ou entre les mises. Il semble qu'il n'y ait pas de doute sur l'avantage offert par une action rapide ne laissant pas à la scorie le temps de se solidifier. Il faut toutefois signaler que cette opinion n'est pas générale : il y a des forges qui travaillent actuellement le fer en matrices closes à la presse et produisent des pièces tout aussi saines que celles matricées sous un pilon. Cette question perd de jour en jour de son importance, puisque nous savons quelle concurrence souvent victorieuse fait aujourd'hui au fer, l'acier extra doux fondu.

Quoiqu'on soit encore peu riche en nombres fixant sur les diverses résistances des métaux forgés dans les mêmes conditions à la presse ou au marteau, il est acquis que l'action du pilon serait surtout superficielle, celle de la presse s'exerçant à cœur. Le grain des lingots forgés à la presse est plus fin vers le centre : au contraire, celui des lingots forgés au pilon serait un peu plus gros. Ainsi quand le lingot est de fort tonnage, le forgeage de la partie centrale serait imparfait avec le pilon.

A cela on objecte que la partie centrale est presque toujours enlevée dans les pièces qui doivent résister à de grands efforts dynamiques (*telles que tubes de canons, frettes*, etc.) ; les arbres de marine sont eux-mêmes forés, etc... Du reste, l'objection perd aujourd'hui de sa valeur à cause du forgeage sur mandrin très souvent employé : dans ce cas on exécute au pilon un forgeage s'exerçant dans toute l'épaisseur du métal frappé.

On ne peut encore savoir si à transmission intégrale de l'effort, le résultat du choc est inférieur ou supérieur à celui de la pression. Il ne faut pas perdre de vue que de pareils essais si simples de prime abord ne sont tentés par les usines que lorsqu'une nécessité urgente se fait sentir ; dans le travail courant il ne leur est pas possible de tenter des expériences d'un intérêt fort secondaire pour elles, puis-

que les procédés de forgeage dont elles disposent sont plus que suffisants pour procurer au métal toutes les propriétés qu'il est susceptible d'acquérir, étant donnée sa constitution chimique.

C'est surtout ce dernier facteur, non moins important, qui fait beaucoup plus souvent l'objet de leurs préoccupations, car il influe d'une façon prépondérante sur les propriétés mécaniques, en admettant toutefois que les divers traitements métallurgiques aient été appliqués suivant les règles reconnues comme bonnes.

Il semble donc résulter de tout ce qui précède que c'est surtout la question d'économie qui milite le plus en faveur de la presse, car elle réduit le nombre des chaudes et la durée du travail, or c'est chose essentielle dans l'industrie : quant à la qualité du forgeage, elle paraît être légèrement supérieure avec la presse, à moins que l'on n'use des artifices qui permettent, avec le pilon, de forger complètement à cœur, comme il arrive en pratiquant le bigornage, le forgeage sur mandrin, etc.....

V. — *Remarque relative aux presses de faible puissance.*

Le développement des presses de moyenne importance a été retardé jusqu'ici par suite du prix élevé des appareils, accumulateurs, etc..... Il semble qu'il soit nécessaire, pour permettre aux petites usines l'emploi des presses de faible puissance, d'avoir recours à des dispositifs plus simples pour ces engins. Peut-être les presses du type *Breuer* et *Schumacher* pourraient-elles donner une solution de la question. L'installation comprend en effet *la presse* et le *compresseur*. Le relevage se fait par la vapeur à l'aide d'un ou deux cylindres mis en communication avec la chaudière.

Le *compresseur* est constitué par un cylindre à vapeur et son piston, dont la tige forme piston hydraulique dans un corps de pompe placé au-dessus ; en admettant la vapeur sous le piston, l'eau est refoulée dans le pot de presse, ce qui produit dans le lingot une empreinte proportionnelle à la course effectuée par le piston à vapeur.

Les pompes à *compresseur* ont des puissances très variables, depuis 250 tonnes jusqu'à 6000 tonnes.

Article 2. — Le laminage.

Notions générales. — *Henry Cort*, l'inventeur du four à puddler, passe également pour avoir été le premier à employer l'étirage en cannelures au lieu de l'étirage au marteau, si long et si dispendieux. Par le laminoir, la transformation du métal en barres de section déterminée ou en tôles d'épaisseur régulière devenait une des opérations les plus simples et les plus commodes de la métallurgie physique. Introduit vers 1783 en *Angleterre*, cet engin n'apparut en *France* que vers 1815 où il s'y vulgarisa rapidement.

Le laminage proprement dit, c'est-à-dire la transformation en barres ou en tôles, à l'aide de cylindres à axes parallèles tournant en sens inverse, à surface cannelée ou unie, ne suffit bientôt plus pour les besoins de l'industrie. Des modifications furent apportées à cet engin si simple, et à côté des laminoirs ordinaires apparurent des *laminoirs spéciaux* donnant des barres de section variable suivant leur longueur, transformant les barres en tubes, etc...

I. — *Le laminage ordinaire*

A. — *Quelques mots sur l'action du laminoir.* — La théorie mécanique du laminoir ne ressortit pas à notre étude, elle est du domaine de la mécanique. Nous ajouterons cependant que l'étude de son action n'est pas aussi simple qu'elle le paraît et présente une véritable difficulté de compréhension, car c'est au fond la même question que celle du patinage de la locomotive. Il ne suffit pas de se payer de mots et de dire que la barre passe dans le laminoir parce qu'*elle adhère* aux cylindres.

Lorsqu'un corps en mouvement, pressé contre un autre corps, frotte sur lui, il peut l'entraîner dans sa course ou glisser sur sa surface; cela dépend de la pression que les deux corps exercent l'un sur l'autre, de la masse du corps à entraîner et, en général, de la résistance qu'il oppose au déplacement. Le laminoir *lamine* ou *patine;* le mouvement produit étant, en tous cas, celui qui correspond au plus petit effort.

« La marche de la locomotive, dit M. le capitaine d'artillerie *Du-*

« *guet* (1) est inverse de celle du laminoir, et les mouvements de l'une « peuvent aider à comprendre ceux de l'autre.

« Considérons donc une locomotive attelée à un train assez lourd « pour qu'elle ne puisse démarrer, elle patine. Une force en sens in- « verse du mouvement, un frottement est exercé par le rail sur la jante « de la roue, frottement d'autant plus fort que la locomotive est plus « lourde, que la pression sur le rail est plus considérable. La locomo- « tive n'avance pas *parce que ce frottement de glissement est inférieur « à la somme du frottement de roulement de tout le train (y compris « la locomotive) et de la composante du poids du train parallèle à la « rampe.*

« Le rail exerce un frottement sur la locomotive, inversement la « jante exerce sur le rail un frottement dans le sens du mouvement : « cette force tangentielle, exercée « par la roue, est capable de déplacer « le rail auquel elle est appliquée, « s'il est libre et si la pression et, par « suite, le frottement de la roue sont « assez puissants. Le rail alors se « déplacera d'avant en arrière com- « me la barre qui passe au laminoir.

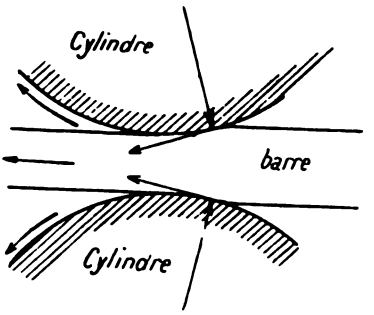


Fig. 138.

« Lorsque le lamineur présente « une barre entre les cylindres, il « donne naissance à un frottement, « d'autant plus fort que la pression de la barre est plus grande et qui « retarde le mouvement de rotation; inversement les cylindres frottent « sur la barre comme la roue sur le rail et tendent à l'entraîner dans « le sens de leur mouvement.

« *Aussi, dans certaines limites, l'ouvrier n'a-t-il qu'à pousser suffi- « samment la barre pour la faire prendre entre les cylindres.* »

Telles sont les conditions d'ordre mécanique que nous avons cru devoir rappeler avant l'étude pratique de cet engin si remarquable par sa simplicité et la régularité de son travail.

B. — *Définition du laminoir.* — Les laminoirs sont des cylindres en

(1) Les études du capitaine *Duguet* sur la « *Résistance des corps solides* » présentent un haut intérêt, elles éclairent sous un jour nouveau certaines questions fort ardues de la mécanique générale.

fonte ou en acier munis de tourillons ou *collets* formant, par leur ensemble, une cage de laminoirs.

Dans une cage se trouvent au moins deux cylindres et souvent trois travaillant, dans ce dernier cas, le premier avec le deuxième et le deuxième avec le troisième (laminoirs trios).

On nomme *table* cette partie du cylindre qui est comprise entre les tourillons des extrémités et qui est dans l'intérieur des cages, restant disponible pour le laminage.

Au delà des *collets* reposant sur les coussinets de la cage, le laminoir se prolonge par le *trèfle* servant à l'attelage avec le moteur : le trèfle, vu sa destination, est rarement cylindrique, sa section est le plus souvent en *étoile*.

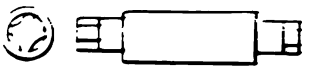


Fig. 139.

Quand elle est carrée ou cylindrique, cette section est munie de deux rainures opposées l'une à l'autre.

Pour le laminage des tôles, la table a la forme d'un cylindre ; pour les barres profilées elle est cannelée. Quelquefois la table est formée de plusieurs cylindres échelonnés *ou en gradins* et servant, au moyen de diverses entrées ou *guides*, à laminer des fers plats, des ressorts d'acier, etc...

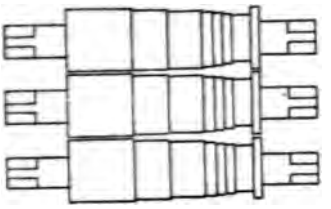


Fig. 140. — Cylindres à gradins.

Les cylindres les plus complexes à examiner sont évidemment les cylindres à *cannelures*.

On entend par *cannelures* les entailles très variées, rainures, saillies, que portent les cylindres et qui servent à donner le profil au lingot ou au paquet de fer : pour constituer une cannelure il faut au moins une paire de cylindres travaillant ensemble.

Le cylindre du dessus s'appelle le cylindre *mâle*, celui du dessous le cylindre *femelle*. Entre deux cannelures se trouve une interruption dans la table qu'on appelle *cordon* ou *fausse cannelure*.

On classe les cannelures de plusieurs manières :

I. — *Classification des cannelures d'après leur formation par les deux cylindres.* — Nous nous contenterons de quelques indications fort générales ; l'inspection des figures suffisant largement à fixer sur les tracés.

La figure 141 représente les cannelures *ouvertes ou roulantes*, la figure 142 représente les cannelures *emboîtées ou fermées* ; certaines cannelures sont en partie roulantes, en partie emboîtées. Les cannelures *excentriques*, *intermittentes ou périodiques* sont le plus souvent employées dans les laminoirs spéciaux.

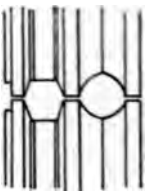


Fig. 141.

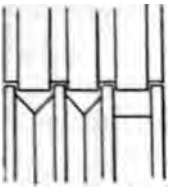


Fig. 142.

La barre qui sort d'une *cannelure excentrique* a naturellement des sections différentes, en plusieurs parties de sa longueur, et qui se reproduisent régulièrement dans cette barre à des distances égales au développement du cylindre.

Les cannelures *intermittentes* sont celles qui n'ont pas la même sec-

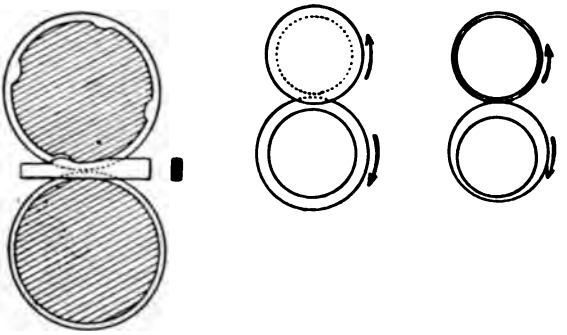


Fig. 143. — Laminoir à crampons (1/10).

tion pendant une révolution de 360°, mais qui sont interrompues suivant un arc de longueur voulue, de manière à présenter un vide entre les deux cylindres ou une entaille entre les deux cylindres. Les petits cylindres pour appointer le fil de fer et même les gros cylindres pour amincir les bouts de lames de ressorts sont tracés de cette manière.

Les cannelures *périodiques* sont celles qui, dans le mâle ou dans la femelle, ou même dans les deux, présentent des enfoncements ou des saillies.

II. — *Classification des cannelures d'après la forme de leur section.* — Les cannelures peuvent être *ogives*, *plates*, *carrées*, *ovales*, *rondes*, *polygonales* et *spéciales* ou *profilées*.

Elles sont, suivant le cas, *roulantes* ou *emboîtées*.

C. — *Produits obtenus.* — Le laminage ordinaire transforme les lingots en barres de différentes sections ou en tôles. Les barres peuvent

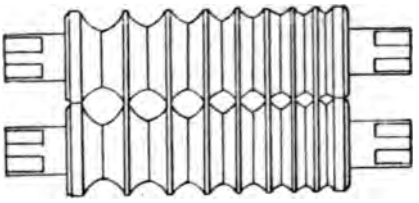


Fig. 144. — Ebaucheur ogive (1/30).

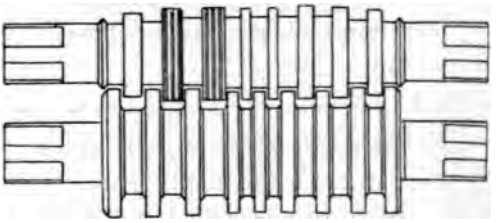


Fig. 145. — Ebaucheur plat (1/30).

être utilisées sous cet état ou débitées en tronçons ; les tronçons étant soumis, selon le cas, à un nouveau travail de laminage ou à un travail quelconque de forge, au pilon, à la presse ou au marteau à la main.

Il y a lieu, par suite, de distinguer les produits obtenus en partant de lingots de section carrée ou de lingots à section rectangulaire ; ces sections étant le plus généralement admises pour les lingots destinés au laminage.

Les lingots pesant plus de 450 kilog. sont souvent martelés avant le laminage ; ce martelage exige deux ou trois chaudes suivant leur poids.

I. — *Lingots pour barres ou pour pièces de forge.* — On part toujours, dans tout travail de transformation au laminoir, de cannelures *ébaucheuses* donnant au métal très chaud d'assez grandes déformations pour arriver aux cannelures *finisseuses* régularisant la forme de la section sur la barre déjà bien moins chaude.

a) — *Les cannelures ogives* sont surtout employées dans les laminoirs ébaucheurs ou dégrossisseurs quand on se propose d'arriver finalement à une section carrée. La décroissance est réglée suivant la qualité du métal qu'on a ordinairement à laminer, et c'est là, du reste, une règle générale : si le métal peut supporter une décroissance plus forte, on pourra sauter une ou deux cannelures. En principe, la hauteur d'une cannelure est plus petite que la largeur de celle qui la suit ; de là, la nécessité de tourner le lingot de 90° à chaque passe.

Le refroidissement n'étant pas comparable en tous les points de la cannelure, si les premières passes effectuées sur un métal très chaud

se faisaient avec un profil géométriquement semblable au profil recherché, on aurait, en fin de laminage, une barre à section déformée.

C'est par une franche déformation donnée à la première cannelure ébaucheuse et par des modifications successives de cette forme dans les cannelures suivantes, jusqu'à ce qu'on atteigne une section très voisine de la section voulue, qu'on arrive à celle-ci en fin de laminage.

La détermination des sections déformées telle qu'elle est établie ne peut se justifier à aucun point de vue théorique : tout ce qu'on peut dire c'est que l'expérience a démontré que ces tracés, adoptés tout à fait empiriquement par les forges, répondent à une bonne compression de la matière et que cet ensemble d'arcs de cercle et de lignes droites a reçu la sanction de la pratique.

b) — *Les cannelures à peu près carrées* servent alors sans inconvénients pour les passes de finissage, elles sont tracées et tournées de manière que l'une des diagonales soit perpendiculaire à l'axe du cylindre et l'autre parallèle à la table, la diagonale horizontale étant un peu plus longue que l'autre à cause de son retrait plus fort dans cette direction.

Le dégrossissage des lingots par cannelures ogives ou carrées est d'un usage très courant dans les aciéries, non seulement pour arriver directement à des barres de toute section à l'aide de toutes les combinaisons de laminoirs, mais aussi pour fournir ce qu'on nomme des semi-produits *blooms* et *billettes*. Ces blooms et billettes sont des fractions plus ou moins longues obtenues à la cisaille à chaud de lingots déjà laminés et de sections plus ou moins fortes : ces demi-produits devant servir pour un usage ultérieur dans l'aciérie même ou devant être vendus pour que le consommateur les transforme en barres ou en tel autre produit par forgeage au pilon, à la presse, etc...

Ce qui différencie le bloom de la billette, c'est la section : on entend généralement par bloom toute fraction de lingot déjà corroyé de 10 à 24 cm. de côté et d'une longueur pouvant atteindre 12 mètres ; les billettes ont de 3 1/2 à 10 cm. et sont découpées également à la cisaille aux longueurs que le consommateur désire.

D'une manière générale, le passage du bloom à la billette n'a rien d'absolu, il varie d'une usine à l'autre et, même suivant les circonstances de la fabrication, dans un même établissement.

Les blooms et les billettes peuvent être employés comme les lingots pour la fabrication de toutes les barres rondes, carrées ou profilées ou

pour un travail ultérieur de forge au marteau-pilon donnant des pièces telles qu'essieux, arbres, pièces de machines, etc...

c) — Quand on veut obtenir des sections rectangulaires, les laminoirs ébaucheurs doivent avoir des cannelures s'éloignant peu du carré, puis au fur et à mesure que le lingot se dégrossit la cannelure s'élargit suivant une loi déterminée et devient emboîtée afin d'avoir des angles plus vifs.

Les très grosses sections rectangulaires ne sont employées que pour obtenir des ébauchés livrés par l'usine à des consommateurs qui débiteront ces pièces et les soumettront ensuite à un travail de forge quelconque. Les sections rectangulaires plus faibles ne sont obtenues qu'en partant des sections carrées des blooms ou billettes par un travail de déformation de bien moindre importance.

On emploie aussi quelquefois des cylindres dits à gradins dont nous avons parlé plus haut.

Les *cannelures ovales* servent d'ébaucheurs et de finisseurs aux barres rondes de faible section; on les emploie aussi pour le finissage des gros ronds. La loi de décroissance des diamètres dépend de l'expérience et ne s'acquiert que par tâtonnements ; de son bon établissement dépend la régularité de la section circulaire finale et l'absence de bavures ou repliures le long des génératrices. Quand on descend à de très petits diamètres, la vitesse des trains de laminoirs augmente considérablement (de 250 à 500 tours par minute), car il y a lieu d'aller d'autant plus vite que le refroidissement du métal est plus rapide : avec de pareilles vitesses il importe au plus haut point d'avoir un personnel de lamineurs fort agiles et encore n'est-on pas à l'abri des accidents et des malfaçons.

On ne descend généralement pas, au laminage à chaud, au-dessous de 4 à 5 mm. de diamètre ; ce fer laminé qui s'enroule en couronne, dès la première passe du laminage, sur une bobine ad hoc prend le nom commercial de « *machine* » et le train de laminoir qui l'a fabriqué s'appelle « *train de machine* » ou de « *serpentage* », ce dernier nom provenant sans doute du mouvement si rapide de lacet que prend le fer laminé sur le sol de l'usine quand, sortant des cylindres, il se rend à la bobine.

Le *fil de machine* après *l'étirage à froid* à la filière devient le fil qui fournit à son tour la *pointe, la vis*, la *corde de piano*, le fil d'acier pour *frettage*, pour *dégorgeoirs*, pour *forets de cartouches*, pour *pièces d'hor-*

logerie, etc... ; le diamètre des fils pouvant descendre à quelques dixièmes de millimètre et même moins.

d) Puis sont à considérer les cannelures polygonales pour le laminage des barres dont la section est un polygone régulier de six à huit côtés.

Les ébaucheurs sont ogives comme pour des barres rondes et passent successivement à la section polygonale.

e) Enfin, il faudrait citer *les cannelures pour aciers ou fers profilés* présentant une variété de forme très grande et pour ainsi dire illimitée.

Citons parmi les plus importantes : les *rails*, les *cornières*, les simples T ou doubles T, fers à C ou double C, etc..

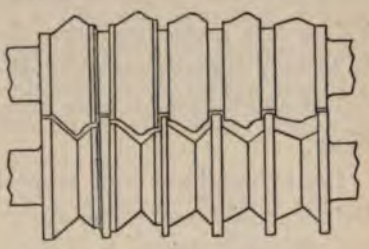


Fig. 146. — Cornière inégale de 95×160 (1/30).

Là encore, des règles fort complexes interviennent pour le tracé ; il ne nous appartient pas de les indiquer, nous nous contentons d'en signaler l'existence (Voir les Traités originaux de *Tunner* et de *Daelen*).

Il importe de ne pas oublier que les cannelures finisseuses doivent être tenues plus fortes que le profil de la barre finie, car le retrait depuis la température du rouge à laquelle la barre quitte le laminoir jusqu'au refroidissement complet est estimé à 1/64 environ. Il y aura lieu de ne pas négliger ce résultat en débitant avec les scies circulaires ou les cisailles à chaud les lingots dégrossis en blooms et billettes ou lorsqu'on affranchira les barres, si les longueurs ainsi déterminées doivent toutefois être comprises entre des limites de tolérance assez resserrées.

f) Dispositifs employés pour éviter l'enroulement des barres. — Une égale répartition de la section de la cannelure dans chacun des cylindres, mâle et femelle, semble le rapport le plus naturel et le mieux proportionné. Par une telle répartition de la hauteur de la cannelure, la barre, en sortant du cylindre, devrait se courber également vers le bas par l'entraînement du cylindre inférieur et vers le haut par celui du cylindre supérieur : théoriquement, elle devrait sortir droite. Pour les métaux corroyés (paquets de fer ou d'acier) il y aurait inévitablement ouverture de la partie supérieure ou inférieure provenant du manque de cohésion de la masse qu'on veut précisément souder. Or, comme il est à prévoir pratiquement que la barre ne sortira pas rigoureusement

droite des cylindres, on préfère déterminer un sens pour l'enroulement, quitte à se garer contre cet enroulement.

Pour cela, on partage la hauteur de la cannelure relativement à la ligne médiane des axes, de manière qu'il y en ait un peu plus *en dessous de cette ligne* et, par suite, on produit une pression de *haut en bas* sur la face supérieure de la barre. En d'autres termes, le diamètre du cylindre au contact de la barre avec la face supérieure de la cannelure est plus grand d'une certaine quantité que le diamètre du cylindre inférieur à la partie inférieure de la cannelure. La surface supérieure de la barre à laminer est plus allongée que la surface d'en dessous, l'effort qui en résulte tend à faire enrouler la barre autour du cylindre inférieur.

Les précautions pour empêcher l'enroulement contre le cylindre inférieur consistent à poser sur le cylindre femelle vis-à-vis des cannelures une plaque entaillée dont les dents entrent dans la cannelure et font sortir droite la barre disposée à s'enrouler. Ou bien on met devant chaque cannelure du côté de la sortie et un peu au-dessus de la barre d'appui des cages une *garde* ou fer profilé en pointe.

Il y a enfin d'autres dispositifs plus ou moins ingénieux dont nous ne pouvons donner le détail et qui complètent ceux que nous venons de décrire.

II. — *Lingots pour tôles.* — Les tôles en acier fondu constituent aujourd'hui un des produits importants de l'industrie sidérurgique. Les chemins de fer, les constructions navales, l'artillerie, etc..... en consomment de grandes quantités, soit en acier doux, soit en acier dur.

L'emploi des tôles en métal fondu ne remonte pas à une époque fort ancienne ; l'Exposition universelle de 1855 montrait pour la première fois une chaudière en tôle d'acier fondu présentée par MM. *Petin, Gaudet et Cie*. Dès que les procédés de fabrication d'acier en grande masse se furent vulgarisés et surtout que l'emploi du ferro-manganèse eût permis d'obtenir des produits doux, bien qu'élaborés sur une sole et avec un garnissage acides, l'industrie comprit toute la supériorité de l'emploi des tôles en acier doux fondu sur celui des tôles de fer bien moins résistantes et moins homogènes.

Les premiers essais d'utilisation des tôles d'acier fondu, pour la construction des chaudières notamment, n'avaient pas été heureux ; les pre-

miers aciers *Bessemer* ou *Martin* employés étant trop chargés les uns en carbone, les autres en silicium.

Les usines livrent aujourd'hui les tôles en acier fondu de toutes qualités et de toutes nuances ; celles en acier *doux* ou *extra-doux* ont remplacé les anciennes tôles en *fer* ou en acier *puddlé ;* les nuances *intermédiaires* servent pour les pièces de machines ou même pour les plaques de blindage auxquelles on donnera la dureté par des artifices spéciaux ; les nuances *dures* ou *mi-dures* servent à fournir, avec les disques qu'on y a découpés, des emboutis destinés à prendre par la trempe une grande élasticité ; quand ces dernières nuances sont *chromées* on s'en sert pour constituer les tôles cintrées pour masques ou abris contre les feux de mousqueterie, plastrons de cuirasses, etc...

Les laminoirs pour tôles sont constitués par des cylindres à surface unie, le cylindre inférieur reste fixe, mais le cylindre supérieur est abaissé à chaque passe et donne la *pression*. Les premières pressions sont les plus fortes ; à mesure que le métal augmente de dureté on serre de moins en moins les cylindres. Le corroyage final est, en moyenne, de 1/20 ; le déchet de feu, soit la perte par oxydation, est très variable et est compris entre 3 et 5 0/0 ; le déchet total, y compris les chutes effectuées généralement à la cisaille à froid après laminage, dépasse rarement 20 à 25 0/0.

A chaque passe, on a soin de balayer toute la surface de la tôle pour enlever les oxydes qui se détachent : aux dernières passes, un conduit placé au-dessus de la table du laminoir fait couler de l'eau en gouttelettes pour aider au décapage. Quand les tôles ont de fortes épaisseurs, ce qui est le cas des plaques de blindage (de pont ou de muraille), on jette de légères brindilles de bois sur la plaque au moment où elle va passer entre les cylindres : on assure ainsi un décapage plus énergique.

Il sera dit ultérieurement quelques mots de la fabrication des plaques de blindage à propos des opérations de trempe.

Pour les plaques de blindage dites « *de diminution* », c'est-à-dire présentant une section pentagonale allongée requise dans certains cas pour le cuirassement des navires, l'axe du cylindre supérieur doit faire un angle avec celui du cylindre fixe.

Pour obtenir ce déplacement oblique sans forcer les empoises du cylindre, celles-ci peuvent être munies intérieurement, comme dans le laminoir de *Montluçon*, de coussinets sphériques qui reçoivent les tourillons des cylindres et leur laissent toute liberté d'oscillation.

Il arrive souvent qu'avant de les passer au laminoir, les lingots pour plaques ont été dégrossis au pilon, de même qu'après toutes les opérations mécaniques ou calorifiques primordiales il est quelquefois nécessaire de gabarier à chaud à la presse les plaques laminées avant de les livrer aux machines-outils.

III. — *Remarque sur les dispositifs spéciaux.* — Eu égard aux grandes dimensions qu'on demande aujourd'hui, soit aux barres ou profilés divers, soit aux feuilles de tôle qui ont souvent deux mètres de largeur et de 12 à 15 mètres de longueur, on emploie des *appareils réversibles dits reversing* ou des appareils *trio*.

Les machines à triple expansion commencent à être appliquées aux laminoirs : l'emploi des condenseurs tend également à se répandre.

Nous signalons seulement les dispositifs ingénieux adoptés par nos grandes usines pour rendre automatiques les principales manœuvres. Il importe de remarquer, à ce sujet, combien *l'utilisation de la force hydraulique* paraît se généraliser pour donner la solution des divers problèmes qui se présentent dans les ateliers de laminage.

L'électricité est depuis longtemps mise à contribution dans les ponts roulants, grues, pompes donnant la pression aux machines hydrauliques destinées à charger les lingots et les blooms dans les fours, etc...

Le spectacle offert par le fonctionnement des divers engins ou appareils d'une halle de laminage est vraiment intéressant.

Ici, l'on voit un lingot au rouge cerise clair paraissant s'avancer de

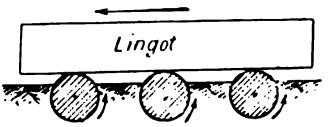


Fig. 147

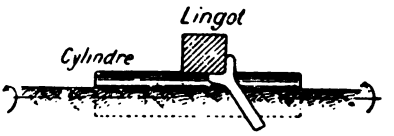


Fig. 148.

lui-même vers les cylindres qui doivent le laminer. En réalité, ce lingot prend appui sur des galets ou rouleaux dépassant légèrement le sol de l'usine et animés d'un mouvement de rotation à l'aide d'une transmission que nous ne saurions décrire.

On voit aussi quelquefois, disposés sur la route que suit le lingot sur les cylindres rouleurs, cachés dans le sous-sol et n'apparaissant qu'en

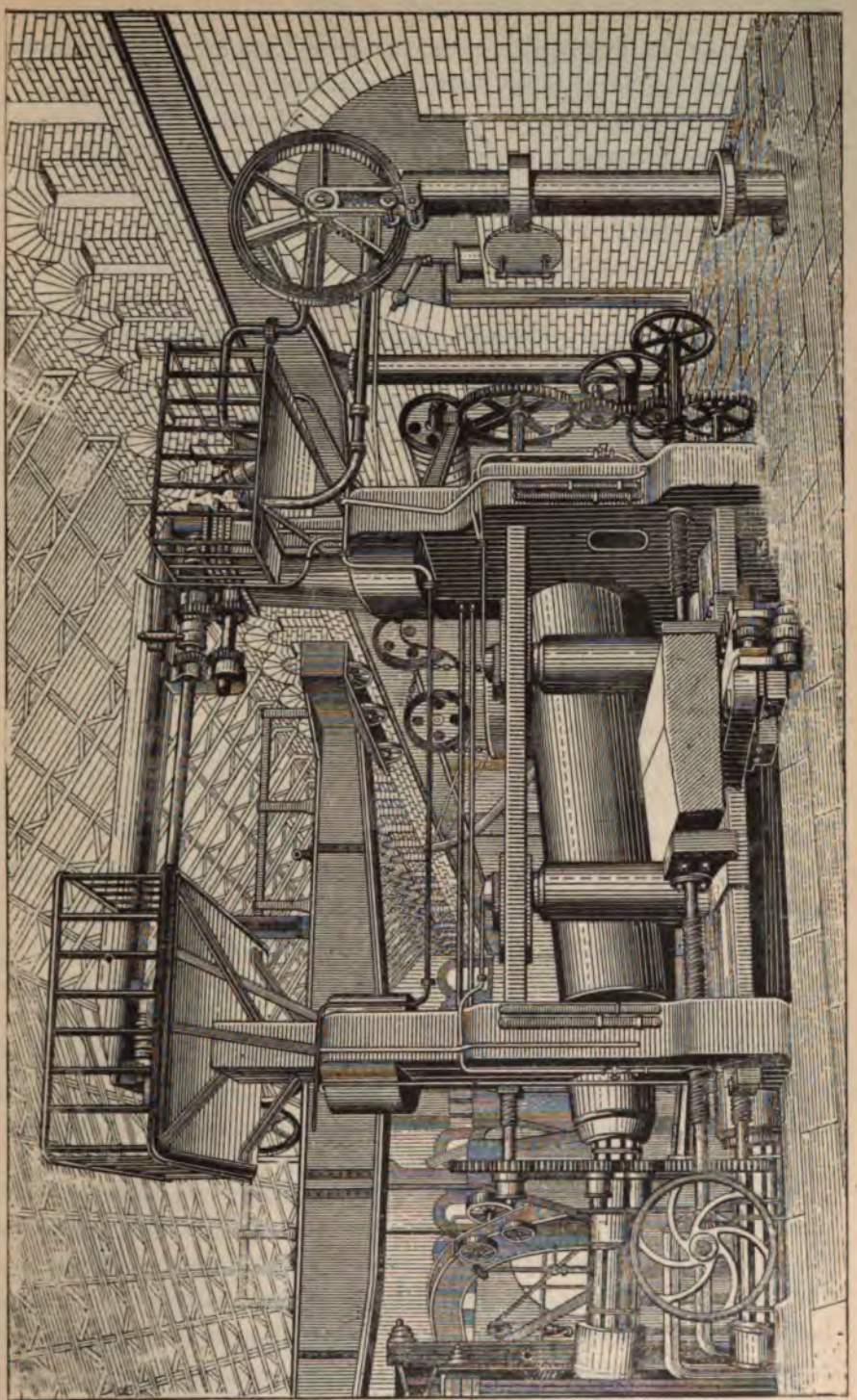


Fig. 149. — Grand laminoir universel à blindages de l'usine Saint-Jacques à Montluçon.

temps opportun, de grands leviers qui agissent sur lui pour lui do quartier avant qu'il ne passe dans la cannelure voisine.

Plus loin, en face d'un *trio*, on verra disposé en avant et en ar du laminoir un *tablier releveur* pouvant également remplir l'offic *conducteur* de lingots. Ce tablier, formé de plaques de tôle entre quelles sont montés des *galets* ou *cylindres* horizontaux, pourra pre un mouvement d'ascension ou de descente afin de recevoir le ling l'un des deux étages du trio pour l'amener à l'autre.

Certains tabliers comprennent des dispositifs destinés à empêch refroidissement des tôles pendant le laminage.

Pour éviter le cisaillage latéral des larges plats, larges tôles ou ques de blindage, le métal s'épanouissant irrégulièrement à droite gauche sous la pression des cylindres, on a recours aux *laminoirs versels*. Dans ces laminoirs, aux deux cylindres proprement dits e çant la pression verticale viennent s'ajouter deux galets à *axe de r tion vertical* dont l'ensemble constitue avec les cylindres horizon une cannelure plate entièrement fermée.

Nous pourrions citer bien d'autres dispositifs ; leur nombre, leur riété, leur agencement mécanique constituent le fonds des ouvr spéciaux concernant le laminage et ne ressortissent pas à notre s

II. — *Les laminages spéciaux*

Quelques exemples suffiront pour donner une idée de l'ingéni des divers dispositifs employés pour les *laminages spéciaux ;* nous vons pas la prétention de signaler tous les cas déjà réalisés en *Fr* ou à l'*étranger*, ni de donner de ceux que nous indiquons une des tion complète.

Pour quelques-uns de ces procédés exploités à l'étranger, des trictions doivent être faites au point de vue de leur valeur prati les données que nous possédons à leur sujet étant encore incertai

A. — *Procédé Mannesmann pour tubes métalliques*. — Dans le l nage ordinaire, le lingot est bien soumis à une pression dans son sage à travers les cannelures, mais en même temps que les zones trales sont refoulées, les couches extérieures sont soumises à un e tangentiel et poussées en avant par le frottement et le mouvemen rotation des laminoirs.

En marche courante on peut admettre que tout est prévu et calculé pour que la vitesse d'entraînement des couches extérieures et la vitesse de refoulement des couches centrales soient égales. Le lingot se dégage régulièrement sous la section que la cannelure doit lui donner uniformément. Si la vitesse des laminoirs s'exagérait, on peut concevoir que le noyau intérieur ne pourrait se déplacer avec la même vitesse que les couches extérieures et qu'il tendrait à se former un creux à l'intérieur du lingot et pendant son passage.

Telle est l'idée qui semble avoir conduit MM. *Mannesmann* à l'invention de leur procédé.

Considérons un lingot cylindrique chauffé au rouge cerise clair et main-

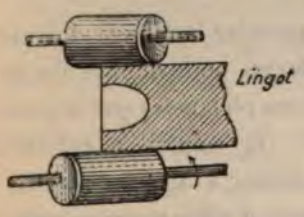


Fig. 150.

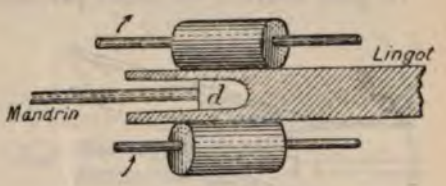


Fig. 151.

tenu en direction dans l'appareil par des glissières appropriées, puis deux cylindres de laminoirs entaillés de rainures en spirale dont les axes font un angle α avec l'axe du lingot, les bouts des deux cylindres étant chanfreinés en forme de cône du côté de l'arrivée du lingot.

Le lingot a pour diamètre la distance comprise entre les rayons d'entrée des cônes ; il est ainsi forcé de subir une diminution de section et cela engendre la résistance qui s'oppose à son passage libre entre les deux cylindres lamineurs. Les couches superficielles sont entraînées par le frottement à très grande vitesse.

L'arrière du lingot arrêté par les chanfreins ne peut suivre le mouvement et reste en retard aussi bien que la partie centrale.

On voit un creux se former à l'avant du lingot en forme de coupe. Cette cavité se prolonge de proche en proche jusqu'à ce que le lingot soit entièrement sorti des laminoirs.

L'appareil a été complété par l'adjonction d'un mandrin. — Lorsqu'il devient nécessaire d'augmenter l'inclinaison des cylindres afin d'accélérer leur poussée en avant, l'action retardatrice des cônes d'entrée est insuffisante. Le mandrin, ayant pour objet de s'opposer à la poussée,

est fixé suivant l'axe du lingot. Il porte une tête ou champignon *d* qui peut tourner avec un jeu nécessaire sur sa tige, tige mobile elle-même dans des coussinets. Une vis agissant sur l'extrémité libre de la tige permet de maintenir le champignon à l'endroit même où commence l'engrènement du lingot entre les deux cylindres ; cette position est rigoureusement nécessaire pour le succès de l'opération.

En même temps qu'il guide le débouché du tube, le mandrin en polit la surface intérieure sans avoir, d'ailleurs, à exercer un effort notable.

La vitesse de rotation des laminoirs est considérable : 250 à 300 tours par minute. En une demi-minute, on transformerait en tube, d'après les inventeurs, une barre d'acier de 3 à 4 mètres de longueur et de 100 mm. de diamètre.

Le plus souvent les tubes préparés par le premier laminage doivent être élargis pour donner les dimensions réclamées par le commerce. On emploie à cet effet un laminoir à disques rotatifs, construit d'ailleurs sur le même principe que le laminoir préparateur.

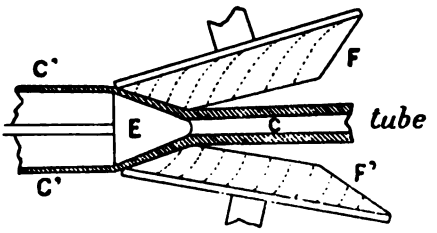


Fig. 152.

Il consiste essentiellement en deux troncs de cône FF' opposés, tournant en sens inverse et à même vitesse ; les faces des cônes portent des rayures.

Entre les deux cônes est placé le mandrin E contre lequel est poussé le tube à élargir C chauffé au rouge cerise clair. Une fois le tube saisi et entraîné, il s'élargit en forme de cône en amincissant ses parois et sort en un tube C'C' qui se débite régulièrement avec une épaisseur et un diamètre constant jusqu'à la fin de la passe.

Telle est la description du procédé qui a fait grand bruit il y a 6 à 7 années et dont l'exploitation s'est poursuivie aux usines de *Remscheid* (Westphalie), de *Komotau* (Autriche), etc..... et sur lequel les Revues techniques ont cessé depuis quelque temps de donner des renseignements.

B. — *Procédé de laminage pour chaînes.* — La fabrication des chaînes ordinaires à maillons soudés offre de grandes difficultés car il faut des ouvriers très exercés pour donner de la solidité aux joints des divers maillons. Le problème de la fabrication des chaînes sans soudure s'est

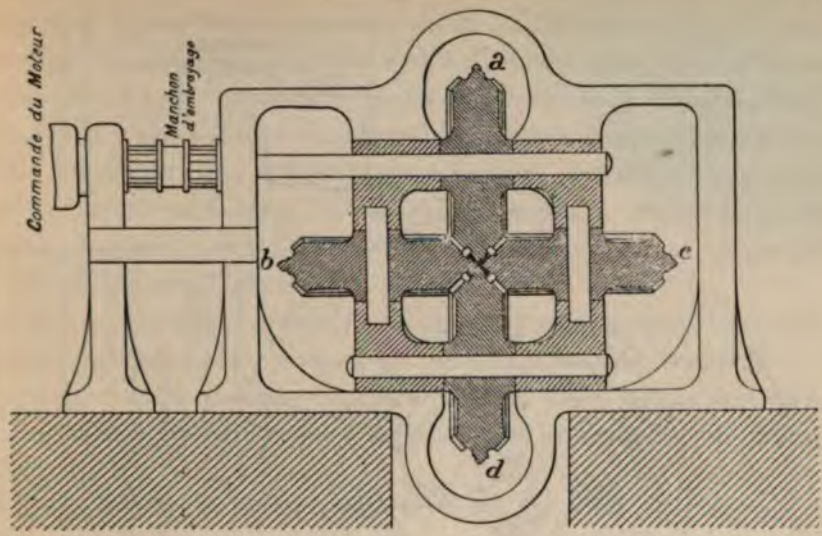


Fig. 153. — Fabrication des chaînes sans soudure (laminoir spécial, système Klatte). Figures schématiques. — Ensemble de l'appareil : coupe verticale.

Nota. — Pour laisser plus de clarté au dessin, tous les détails de construction ont été supprimés. Il est à remarquer que les cylindres lamineurs sont constitués de la façon suivante : sur le même arbre sont calées les deux couronnes dentées, entre elles vient se fixer le disque à empreintes qui est lui-même formé de plusieurs segments en acier serrés entre les couronnes dentées par des clefs à excentrique.

a, b, c, d : cylindres lamineurs. Le cylindre vertical *a*, actionné par le moteur, entraîne par ses deux couronnes dentées les cylindres horizontaux *b* et *c* qui engrènent à leur tour avec le quatrième cylindre vertical, *d* ; les quatre cylindres agissent de cette façon simultanément sur la barre d'acier.

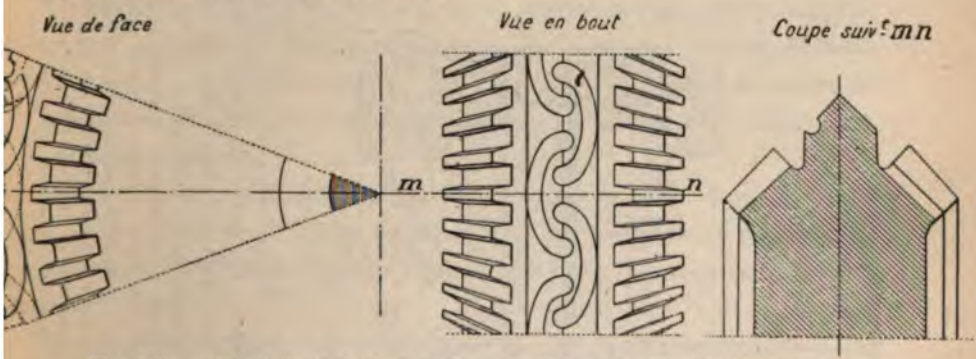


Fig. 154. — Détail de la denture et des empreintes des cylindres lamineurs.

Fig. 155. — Profil cruciforme des barres d'acier employées pour la fabrication des chaînes sans soudure.

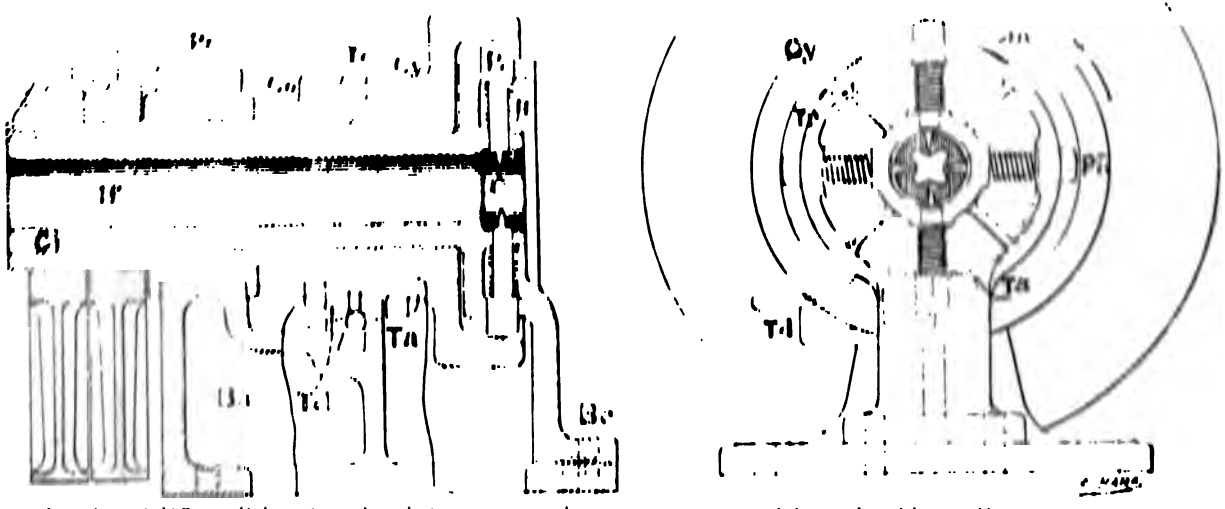


Fig. 156 et 157. — Fabrication des chaînes sans soudure (poinçonneuse rotative à 4 outils, système Oury).

Pf, poulie fixe. — *Pl*, poulie folle. — *Pr*, palier. — *Co*, coulisses du cylindre intermédiaire entraînant le cylindre extérieur dans le mouvement de rotation et le guidant dans le mouvement de translation. — *Te*, toc commandant le mouvement de recul. — *Cy*, cylindre extérieur à cames agissant sur les poinçons. — *Pc*, poinçon. — *R*, ressort de rappel du poinçon. — *If*, cylindre intérieur fixe portant les poinçons. — *Ci*, cylindre intermédiaire recevant le mouvement de rotation et le communiquant au cylindre extérieur. — *Ba*, bâti portant tout l'appareil. — *Td*, toc double à coulisse agissant sur les tocs du cylindre extérieur et déterminant son mouvement de va et vient. — *Ta*, toc commandant le mouvement d'avance. — *Bc*, bâti supportant le cylindre intérieur. — *Cm*, came intérieure. — *Tr*, toc de recul. — *Pr*, poinçon et son ressort de rappel.

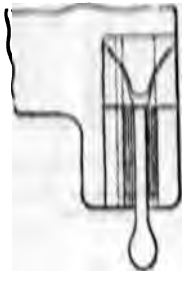


Fig. 158. — Plan du toc double à coulisse.

donc posé depuis longtemps. Nous citerons parmi les nombreux appareils employés et pour donner une idée de ce genre de fabrication, le laminoir de *Klatte*. Nous dirons toutefois que c'est à M. *Oury* de *Cherbourg* qu'il y a lieu d'attribuer le mérite d'avoir exécuté le premier, en 1881, des chaînes sans soudure par un système méthodique et *presque exclusivement mécanique*, consistant en perçages, poinçonnages et forgeages en matrices à chaud et à froid ; nous en donnons (pages 205 et 206) les dessins explicatifs.

Sans nous arrêter à de nombreux procédés plus ou moins ingénieux adoptés successivement, passons au laminoir *Klatte* de *Neuwied*.

Comme tous les inventeurs précédents, M. *Klatte* a pris une barre d'acier préalablement obtenue à un laminoir à cannelures et de section *cruciforme*.

La difficulté réelle de ce laminage consiste dans la précision nécessaire non seulement pour la position relative des creux de chaque cylindre lamineur, mais pour le réglage des axes de ces cylindres. Dans la machine *Klatte*, les résultats sont assez satisfaisants en pratique, car les maillons sont semblables à moins de 2 0/0 près.

Les expériences faites sur ces chaînes ont, paraît-il, donné une résistance à la rupture supérieure aux nombres obtenus sur les mêmes modèles avec soudure ; la force de ces dernières ne serait égale qu'à 7 0/0 de la puissance de celles sans soudure.

Les figures ci-dessus suffisent pour se rendre compte du travail produit par le laminoir. La barre sortant des cylindres est rapidement débarrassée des attaches minces au moyen d'une poinçonneuse et sa température est suffisante pour que l'arrachement dans les deux sens se fasse sans avarie.

On achève la séparation des maillons matricés ainsi dans la barre et l'on donne en même temps la forme et le jeu définitifs en réchauffant la chaîne et en la faisant passer dans un train de finissage ou sous une presse à forger.

Par le procédé *Oury* on arrivait par une série de matriçages et de découpages, avec peu de perte de métal, à modeler une chaîne dans un fer en croix.

La barre chauffée au rouge cerise clair subit en une chaude une opération sur les deux faces perpendiculaires, puis après réchauffage elle en subit une autre dans une machine analogue et ainsi de suite.

Dans le type de machines employées, les *poinçons ou matrices* agis-

sant sur la chaîne à ses divers degrés d'avancement, sont mis en mouvement par des ressorts à boudin actionnés au moyen de *tocs* ou *cames* distribuées sur la circonférence d'un cercle animé d'un mouvement de rotation au moyen de courroies et de poulies.

C. — *Laminage de la tôle en feuilles continues en partant de l'acier liquide.* — La fabrication des tôles continues des différents métaux provenant directement des matières à l'état fluide ou semi-fluide avait préoccupé *Bessemer* il y a déjà fort longtemps; en 1846, il prenait un brevet pour la fabrication directe des feuilles d'étain et de plomb en partant du métal en fusion.

Nous savons de source certaine que pour ces métaux la question est pratiquement résolue.

Quant au laminage de l'acier liquide, il ne semble pas que les essais récemment tentés aux *Etats-Unis* et dont les Revues techniques ont donné le détail, aient quelque chance de réussir.

En passant de l'état liquide à l'état solide, l'acier passe par un état intermédiaire dans lequel il se compose de grains déjà solidifiés entourés d'un ciment encore liquide. Il constitue alors une sorte de mortier et se désagrège dès qu'on veut lui faire subir la moindre déformation, de sorte qu'à cet état il ne peut pas plus se forger ou se laminer qu'un mortier de sable et de chaux.

D. — *Laminage circulaire.* — Les laminoirs employés pour laminer circulairement sont appelés laminoirs à *bandages*, à cause de la fabrication pour laquelle ils ont été tout d'abord inventés. Plus tard, en modifiant la table et le profil des cylindres on s'en servit, et on s'en sert encore, pour laminer circulairement les frettes de petit et de moyen calibre.

Le laminage circulaire comprend deux passes, l'une d'ébauchage et l'autre de finissage, auxquelles on soumet le disque à bandage ou à frette, bigorné après poinçonnage, pour le transformer en pièce brute de forge.

Nous nous contenterons de donner le principe du laminoir circulaire.

A l'origine, on pensa qu'il suffisait, pour laminer circulairement, que le cylindre supérieur pût s'enlever entièrement et sortir des cages au moins par un bout: on enfilait alors le bandage par ce bout, puis on rapprochait le cylindre graduellement avec des vis. Par cette manœu-

vre, le bandage une fois saisi se mettait à tourner en s'amincissant et en augmentant de diamètre.

Ce système, le premier adopté, n'était pas d'une manœuvre facile.

On l'a simplifié en plaçant les rouleaux en porte-à-faux sur le prolongement de l'axe en dehors des cages.

Il suffit alors d'un petit soulèvement pour pouvoir engager le bandage par côté. On préfère souvent encore retourner les rouleaux de manière que leur axe soit vertical : le bandage se lamine couché, son poids ne porte plus à faux et ne tend plus à le déformer. D'ailleurs, des galets guides placés à une certaine distance le maintiennent et le forcent à passer par trois points qui déterminent la grandeur du cercle.

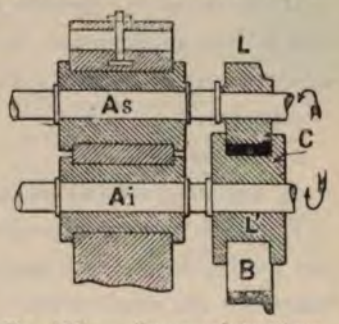


Fig. 159. — Coupe schématique du laminoir à bandages.

L, laminoir supérieur. — *L'* laminoir inférieur. — *B*, bandage. — *C*, cannelure profilée emboîtée. — *As*, arbre du laminoir supérieur. — *Ai*, arbre du laminoir inférieur.

E. — *Laminoirs à roues, etc.* — En combinant plusieurs rouleaux mobiles, on a pu laminer des roues à centre plein. Le disque qui doit

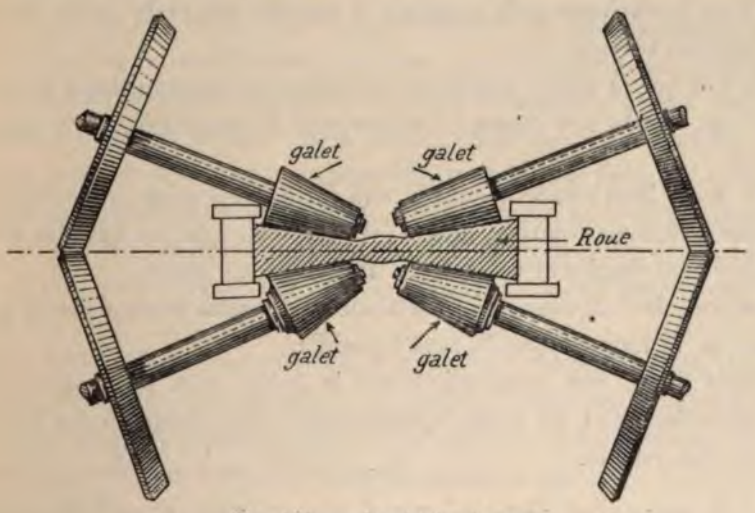


Fig. 160. — Laminoirs à roues.

les former roule entre quatre galets coniques montés sur des bras tournant autour d'un axe vertical, comme les roues d'une meule.

Pour terminer, et *pour mémoire*, nous citerons les laminoirs à canons de fusils, à épée-baïonnette, etc...

D'une manière générale, un métal est dit *forgé* lorsqu'il a été soumis à l'une quelconque des transformations mécaniques à chaud que nous venons de décrire, qu'il ait été travaillé :

au pilon,

à la presse,

ou aux divers types de laminoirs.

Et par là on veut dire que, non seulement sa forme a été déterminée par un déplacement de matière, mais encore que ses qualités de résistance ont été améliorées.

Article 3. — Digression sur le travail des métaux misés

Le *fer* et l'*acier puddlés* ont été définis dans la première partie de ce Traité : on a dit alors en quoi consistait l'opération du *corroyage*.

Pour compléter les quelques notions qui ont été données sur ce sujet, il ne nous reste qu'à indiquer la marche générale suivie dans la pratique du travail.

On sait que la loupe fournit le *massiau*, le massiau donnant à son son tour, après son passage au laminoir de puddlage, le *fer brut* en barres.

Or, le fer brut contient encore une forte proportion de scories inégalement réparties dans la masse ; il en résulte que les qualités de résistance sont faibles et variables d'un point à un autre.

De plus, la longueur, le poids d'une barre sont limités par le poids même de la loupe sortie du four à puddler.

Il faut donc, soit pour améliorer le métal, soit pour obtenir des pièces de forme et de poids quelconques, faire subir au fer brut un travail convenable.

A. — *Notions générales sur la confection des paquets*. — Au préalable, on casse toutes les barres de fer ou d'acier brut venant de chaque four à puddler, et d'après l'examen de la cassure, on les classe suivant leur qualité. Lorsqu'on veut ensuite obtenir une pièce de qualité

donnée, on prend un poids convenable de barres de fer brut de cette qualité : on les coupe à la cisaille en tronçons plus ou moins longs et l'on confectionne un paquet de ces barres en les disposant par lits,

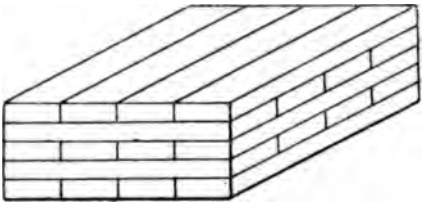


Fig. 161. — Mises en long et en travers.

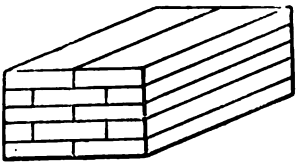


Fig. 162. — Mises en long avec plein sur joint.

jointives et alternativement en long et en travers ou encore *plein sur joint*.

Le paquet ainsi formé est lié avec des fils de fer et porté dans un four à réchauffer où on l'amène au blanc soudant (1490° environ), si c'est *du fer*.

Dans le cas de l'*acier puddlé*, il ne faut pas dépasser le rouge cerise clair et ne pas laisser longtemps le métal à cette température dans le foyer ; il serait rapidement brûlé. Le feu doit être conduit de manière que la flamme ne soit pas oxydante ; le combustible doit être autant que possible exempt de soufre.

Les paquets ont des formes et des sections très variables dépendant de l'objet à façonner. Ces sont des blocs parallélipipédiques à section carrée ou rectangulaire quand ils doivent fournir des pièces longues ou plates : essieux, arbres, tôles, etc..., dans ce cas, les mises sont placées parallèlement à la plus grande dimension de l'objet. Le façonnage devra être conduit de manière à bien orienter la section définitive dans l'objet fini ; si la pièce doit être percée de trous, par exemple, les axes de ces trous devront se trouver disposés perpendiculairement aux mises.

Pour certaines pièces, lorsqu'on ne cherche à obtenir que des fers de qualités médiocres, on assemble en paquet des riblons quelconques, des tournures, des chutes de barres, des déchets de fabrication, etc... ; le tout garanti par une enveloppe de mises de fer brut. Ce procédé n'est applicable, en tous cas, que lorsque le profil de la pièce finie est peu tourmenté et sert surtout à donner des fers communs, plats, carrés, ronds, etc...

Le pilon est employé toutes les fois que la pièce n'a pas le même

profil dans toute sa longueur : dans ce cas, les premiers coups donnés avec prudence servent à opérer le rapprochement des mises et à les souder, la majeure partie de la scorie est expulsée, celle qui reste constitue comme une sorte de ciment facilitant la soudure de la matière. Dans les chaudes suivantes on étirera le métal sur panne et enclume étroites, on le façonnera ensuite à l'aide de tranches à chaud en enlevant le métal en certains points ou à l'aide d'étampes de profils convenables. Souvent même, quand le paquet doit être laminé, on le soumet, au préalable, à l'action du pilon pour mieux le souder, les passes suivantes s'exécutant au laminoir.

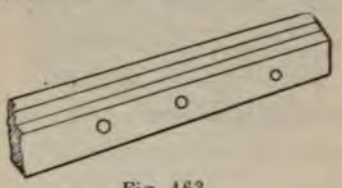


Fig. 163.

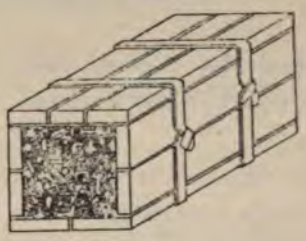


Fig. 164.

La presse n'est généralement pas employée en *France* pour le forgeage des paquets de fer et d'acier parce qu'on prétend que le choc du marteau favorise mieux l'expulsion de la scorie. Il ne faudrait cependant pas croire que cet engin ne puisse être employé pour cet usage : les travaux exécutés dans les *forges anglaises* témoignent du contraire.

Le corroyage subi ainsi par le paquet, soit au pilon, soit au laminoir, améliore sa qualité : pour des produits moins communs on peut constituer les mises extérieures par du fer corroyé une fois ou par du fer ballé ; toutes les mises peuvent même être constituées par des fers ou des aciers plus ou moins corroyés lorsqu'on voudra des produits de choix. Aussi ne peut-on, à cet égard, fixer aucune règle précise ; dans les exemples qui suivent nous nous contenterons d'indiquer sommairement la forme générale des paquets sans entrer dans trop de détails pour la qualité du métal employé.

Le poids d'un paquet se calcule de la manière suivante :

Au poids de la pièce à obtenir on ajoute, quand on doit la passer au laminoir, une quantité supplémentaire de métal telle qu'elle corresponde à une chute de 50 à 60 centimètres aux extrémités de la barre toujours mal soudées. Les barres sortant du laminoir au rouge sombre sont généralement affranchies au moyen d'une scie circulaire placée dans le voisinage des laminoirs. Il faut ensuite ajouter ce qu'on appelle

le *déchet de feu* (oxydes des battitures) d'autant plus fort que le métal est moins fin et que la pièce à obtenir exige plus de chaudes : ce déchet varie de 5 à 10 0/0.

Bien que variant dans les limites précitées, ce déchet est pris en moyenne égal à 8 0/0 *dans toutes les opérations mécaniques à chaud : forgeage à la presse, au pilon et au laminoir.*

B. — *Paquets pour profilés divers.* — Il suffira de jeter un coup

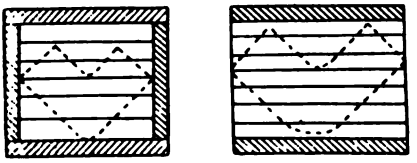


Fig. 165. — Paquets pour cornières.

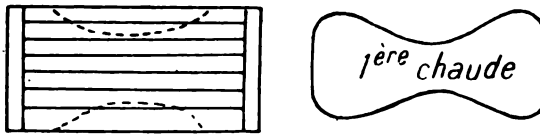


Fig. 166. — Fers à I.

d'œil sur les figures qui suivent pour se rendre compte de la marche générale de la fabrication.

Pour les fers à T difficiles à fabriquer le paquet est plus compliqué, on l'a souvent constitué comme il suit :

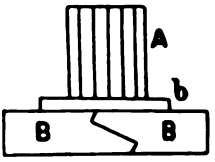


Fig. 167.

Un paquet A pour former l'âme du T.

Deux demi-semelles B assemblées par une enture à traits de *Jupiter*, chacune de ces demi-semelles ayant été fabriquée par laminage d'un paquet.

Une bande de fer brut *b* destinée à amener la soudure de l'âme avec la semelle.

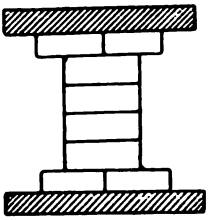


Fig. 168.

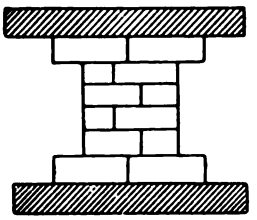


Fig. 169.

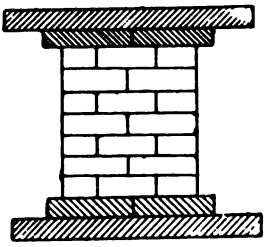


Fig. 170.

Les figures ci-dessus donnent d'autres formes de paquets pour fer à

C. — *Paquets pour tôles.* — Les paquets pour tôles sont généralement formés comme il suit :

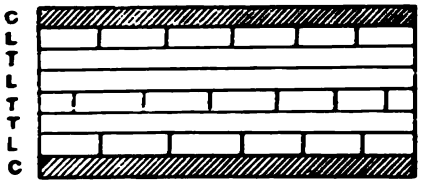


Fig. 171.

C, Couvertes en fer corroyé (laminé en long).

L. Mises de fer brut en long.

T. Mises de fer brut en travers.

On augmente la résistance en travers d'une tôle par l'addition de mises successives dans le même sens.

Au lieu de se servir d'une couverte en fer corroyé, c'est-à-dire d'une tôle provenant du laminage d'un paquet, on peut employer des cou-

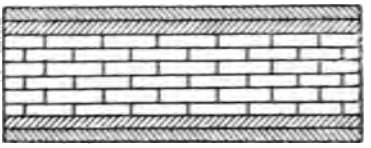


Fig. 172.

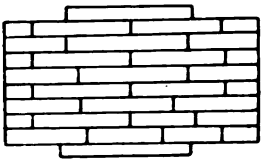


Fig. 173.

vertes obtenues simplement par laminage en plat de 20 mm. de loupes de puddlage martelées.

Étant donné alors la grossièreté de ce métal on en met deux rangs.

Enfin, on peut ne pas mettre de mises en travers et les disposer toutes en long ; cela dépendra de la largeur du paquet par rapport à sa longueur.

Quelques usines ne mettent pas de couvertes et disposent le paquet comme l'indique la figure 173.

Pour préserver des coups de feu la surface des tôles, on recouvre souvent les paquets d'une couche de 1 cm. de terre réfractaire avant de les mettre au four.

Les paquets sont d'abord soudés soit au pilon, soit au laminoir ébaucheur ; puis commence alors le laminage proprement dit ou *laminage finisseur*.

Ce laminage ne comporte qu'une chaude pour les tôles communes et ordinaires et deux pour les tôles supérieures et les tôles fines.

Quant aux tôles minces, on les lamine par groupes de deux, trois et même quatre, en ayant soin de les retourner après chaque passage entre les cylindres du laminoir.

On lamine en travers jusqu'à ce qu'on ait atteint la largeur demandée. A partir de ce moment, le laminage s'effectue en long.

La fabrication des plaques de blindage en fer est faite d'après les mêmes principes ; un paquet est constitué par des mises qui, au lieu d'être plates, sont à section en forme de Z ou de V, de façon à réaliser un soudage plus complet. La plaque est d'abord pilonnée, passée au laminoir, puis gabariée.

Fig. 174.

Les plaques *Compound* consistent en une plaque de fer, qui est le *sommier*, fabriquée comme il est dit ci-dessus et sur laquelle a été soudée une plaque d'acier qui est appelée la face du blindage. La plaque de fer ayant été fabriquée, on la chauffe à la température orangé clair, puis on la place dans une lingotière méplate dont elle n'occupe qu'une partie de l'épaisseur. Dans l'espace libre, entre la plaque de fer et la paroi de la lingotière, on coule de l'acier assez dur. La soudure se fait entre la plaque en fer et l'acier liquide.

Après solidification, la plaque est enlevée de la lingotière et placée dans un lit de cendres où elle se refroidit lentement : on la réchauffe ensuite, on la forge à la presse ou au pilon, puis on la lamine et on la gabarie.

La fabrication des divers profilés, des tôles et des plaques en fer ou *compound*, perd de jour en jour de l'importance depuis la substitution de plus en plus complète de l'acier extra-doux au fer d'une part, et de l'emploi des aciers spéciaux (*nickel-chrome*), d'autre part.

Nous signalons seulement l'ancienne fabrication des pièces à âme cylindrique par enroulement préalable en hélice d'une mise de fer autour d'un mandrin, chauffage au blanc soudant de l'anneau ainsi ébauché et soudage des spires au pilon à l'aide d'étampes appropriées.

D. — *Fabrication des roues en fer forgé par étampage.* — Nous donnerons comme exemple la fabrication de MM. *Deflassieux*, maîtres de forges à *Rive-de-Gier* (Loire).

1° *Préparation des éléments de la roue.* — Les éléments de la roue comprennent : la jante, les rayons, le moyeu.

a) — *Jante.* — Prendre un fer laminé de longueur et de profil convenables, le cintrer à froid entre trois cylindres, souder grossièrement

ses deux bouts et pratiquer une cannelure peu profonde aux points qui se trouveront à l'extrémité des rayons.

b) — *Rayons.* — Prendre un fer laminé de longueur et de profil convenables, refouler un bout préalablement chauffé au marteau-pilon pour former le tenon qui s'engagera dans la cannelure correspondante de la jante.

Pour certaines roues (locomotives et tenders), refouler également l'autre bout en forme de coin.

c) — *Moyeu.* — Enrouler à chaud autour d'un mandrin sous le pilon une barre de fer puddlé ; puis, canneler à chaud en matrices au pilon pour préparer le logement des rayons.

2° *Assemblage des éléments à froid.* — Cet assemblage s'exécute sur une aire horizontale. Il comprend :

Les opérations du calage et du montage grossier de la roue;

La pose des ligatures métalliques;

Les additions de fer brut pour les remplissages ou appendices à faire venir au matriçage, tels que manivelles, etc...

3° *Matriçage à chaud.* — Porter d'abord la roue ainsi grossièrement constituée dans un four à réchauffer et la chauffer au blanc soudant, puis la placer sur la matrice inférieure de l'enclume du pilon. Adapter à la panne une matrice complémentaire de celle de l'enclume, forger la roue entre les deux matrices en répétant ces opérations jusqu'à forgeage complet.

Il est clair que lorsque les deux matrices sont en contact à refus, le vide ainsi ménagé doit être tel qu'il donne, aux surépaisseurs près, la roue brute de forge à obtenir.

4° *Finissage.* — Les opérations de finissage se font aux machines-outils et comprennent les opérations à froid de tournage, mortaisage, rabotage, etc...

Pour les roues de locomotives au moins, l'acier moulé et recuit, quelquefois trempé, commence à être employé à peu près généralement.

Il n'en est pas encore ainsi pour celles de tenders et de wagons dont le bandage seul en acier est fabriqué par les procédés de poinçonnage et de laminage circulaire que nous avons indiqués.

Article 4. — Recuit après forgeage

A. — *Définition du recuit.* — Les essais mécaniques auxquels on soumet un métal forgé montrent que ce métal est devenu beaucoup plus apte à résister aux divers efforts : l'aspect cristallin et grossier du grain lors de la coulée s'est profondément modifié ; le grain est devenu plus fin. Cependant la texture est loin d'être partout régulière ; la pièce a été, en effet, *forgée par parties successives, plus ou moins chauffée* suivant les chaudes et soumise à l'action de l'engin de forgeage *forcément inégale* en chacun de ses points.

On conçoit donc l'utilité d'une opération qui complète et régularise les effets du forgeage ; cette opération calorifique est celle du *recuit après forgeage.*

« *Le recuit consiste à chauffer toute la pièce à une température convenable, généralement celle du rouge cerise clair (soit à la température même du forgeage) et à la laisser ensuite se refroidir.* »

Les théories dont l'exposé sera donné plus loin nous aideront à comprendre comment cette opération calorifique contribue à régulariser les effets du forgeage en donnant à la pièce une texture régulière *à grains fins.*

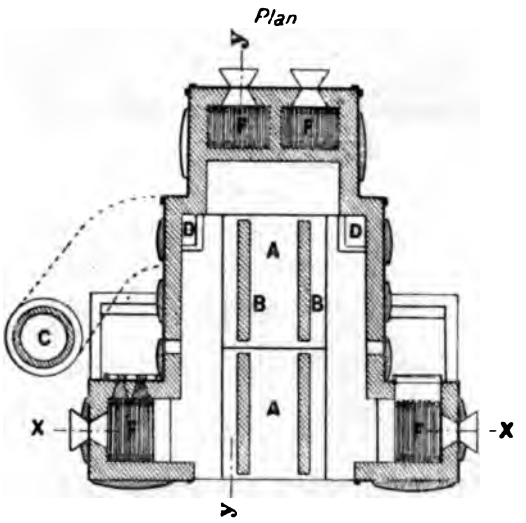


Fig. 175. — Four à recuire.

A, soles mobiles. — *B*, chenêts. — *C*, cheminée. — *D*, sortie des flammes. — Foyers.

B. — *Fours à recuire.* — Les fours à recuire doivent être assez grands pour contenir toute la pièce, les recuits ne devant jamais être partiels.

Ces fours sont le plus ordinairement chauffés par plusieurs *foyers à grille*, presque jamais par des régénérateurs *Siemens :* on en conçoit aisément la raison. Les pièces à recuire n'ayant pas partout la même épaisseur il faut pour

que le chauffage en soit régulier qu'on puisse ralentir la température en certains points et l'activer en d'autres. Aussi chauffe-t-on ces appareils à l'aide de plusieurs foyers à grille qui permettent de régler à volonté la marche de la température dans les différentes parties du four. Les produits gazeux de la combustion arrivent dans le four près de la naissance des voûtes et sont évacués par la cheminée d'appel dont les ouvertures sont dans la sole du four.

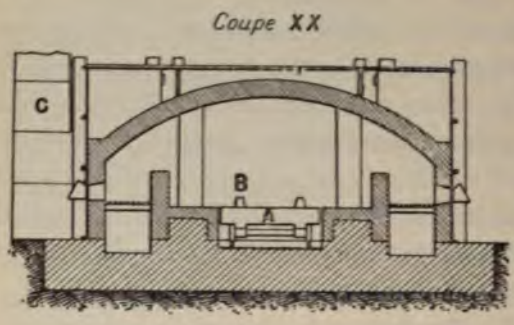


Fig. 176.

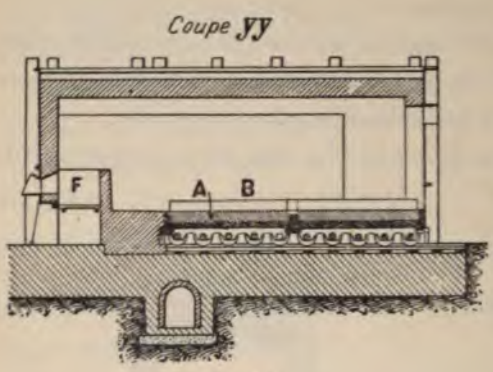


Fig. 177.

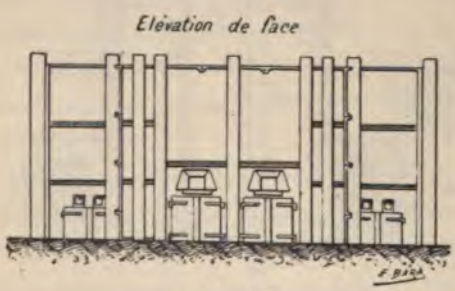


Fig. 178.

Les gaz remplissent ainsi tout l'appareil avant de trouver leur issue et l'échauffent plus régulièrement.

Les figures ci-jointes donnent la disposition d'un four à recuire à sole mobile.

La sole est constituée par des wagonnets à plateforme réfractaire qui permettent un chargement et un déchargement très faciles du four.

Un mur en briques réfractaires reposant sur la queue du premier wagonnet ferme complètement le four : ce mur sera démoli quand on voudra sortir les pièces.

On emploie souvent une porte mobile en briques constituée dans un cadre en fer et dont les joints avec l'ouverture sont soigneusement lu-

tés. Le dessous des wagonnets étant toujours en communication avec l'atmosphère ne s'échauffe pas trop et ne se déforme pas.

Pour suivre la marche du chauffage, on ménage des regards dans le

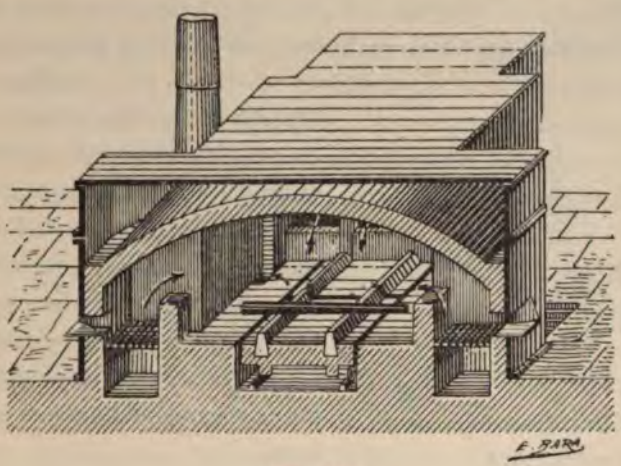


Fig. 179.

mur de fermeture en briques. Un autre dispositif est employé dans certaines usines : au lieu de reposer sur des wagonnets, la pièce à recuire

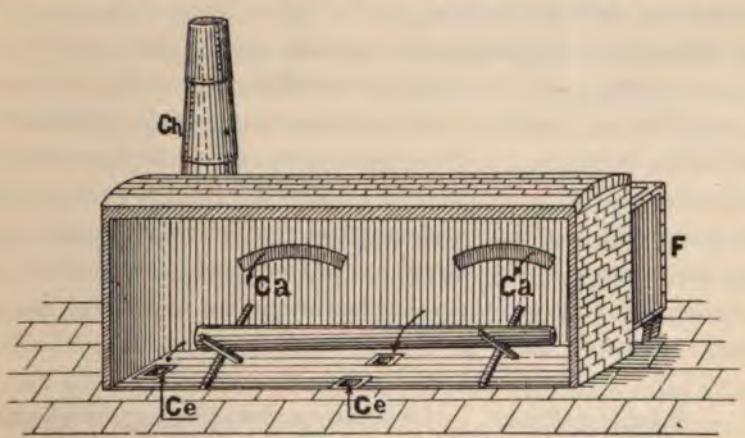


Fig. 180.

Ca, carneaux d'arrivée des gaz. — *Ce*, carneaux d'échappement des gaz. — *F*, foyers extérieurs. — *Ch*, cheminée d'évacuation des gaz.

repose soit sur des rails placés directement sur la sole du four, soit sur des chevalets métalliques. Le devant du four est fermé, soit par un mur

en briques réfractaires qu'on construit rapidement et qu'on démolira pour sortir la pièce après l'opération, soit encore par une porte mobile en briques constituée dans un cadre en fer.

C. — *Conduite du recuit.* — Nous ne reviendrons pas sur les précautions que nous avons déjà indiquées au sujet du chauffage dans les fours à réchauffer avant le travail à chaud : elles doivent être minutieusement observées. La représentation graphique les résume fort simplement : la courbe de chauffage à obtenir devra être la forme 1 et non la forme 2. Le refroidissement de la pièce recuite doit être conduit d'une façon analogue à son chauffage.

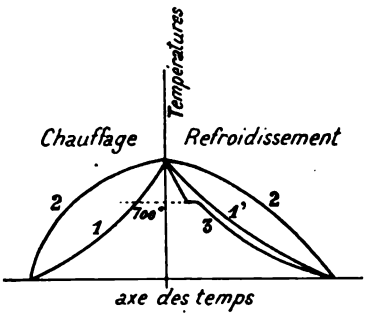


Fig. 181.

On devra chercher à obtenir la courbe 1′ qui, correspondant à un refroidissement rapide aux environs de la température de mobilité des molécules, ne permet pas la cristallisation du métal, et, indiquant un refroidissement lent aux basses températures, évite les tapures.

On devra rejeter les formes de courbe 2′ qui exposent aux deux accidents précédents. Pour bien opérer on s'efforce même d'avoir la courbe 3, c'est-à-dire, on cherche à avoir aux environs de la température de mobilité des molécules un abaissement très rapide de température (*ce qu'on réalise en ouvrant pendant un temps assez long les portes du four*): après quoi, l'état du grain du métal étant fixé, on n'a plus qu'à se préoccuper des tapures, c'est pourquoi on laisse le refroidissement s'opérer très lentement (*ce qu'on réalise en refermant les portes du four ou en plaçant l'objet dans un lit de cendres ou de chaux*).

D. — *Recuits spéciaux.* — Le laminage des tôles, surtout quand elles sont minces, est généralement terminé à basse température, au-dessous du rouge sombre. Il en résulte un écrouissage (*transformation des propriétés mécaniques*) qu'il est bon de faire disparaître, soit pour conserver aux tôles les qualités requises de résistance, soit pour ne pas les exposer à se criquer lorsqu'on veut les cintrer à froid, ce qui est un cas fréquent.

De là nécessité, comme pour toutes les pièces de forge, d'opérer un recuit. A cet effet, les tôles sont empilées dans des caisses métalliques hermétiquement fermées afin d'éviter l'oxydation qui serait funeste, à cause de leur faible épaisseur, et portées dans un four où la température est amenée lentement de 0 à 500°, puis poussée un peu plus vite jusqu'au rouge cerise.

Les caisses sont alors sorties du four et ouvertes de manière que la température baisse rapidement jusqu'à 650° environ, elles sont ensuite refermées et le refroidissement continue jusqu'à la température ordinaire.

Le recuit des tôles épaisses se fait suivant les mêmes principes, mais on les dispose directement dans un grand four où elles reposent sur des supports qui les empêchent de se voiler.

Pour ce qui concerne les barres ou profilés divers obtenus au laminage on *ne procède pas à un recuit* et cela pour plusieurs raisons. D'abord l'opération du laminage des barres ou profilés est rapide, le métal est soumis en chaque section à une action continue de la part du laminoir et à peu près comparable puisque sa température varie fort peu d'une extrémité à l'autre. Les aciers ou fers en barres sont presque toujours destinés à être tronçonnés, les tronçons, après nouveau travail de forge devant fournir des boulons, rivets, écrous, etc... ; or ces ferrures seront recuites après qu'elles auront été finies de forge. Quant aux barres ou profilés devant servir comme fers de construction, leur résistance est plus que suffisante pour les usages auxquels ils sont destinés sans aucun autre traitement métallurgique. Du reste, pour pallier dans une certaine mesure au manque de recuit, les barres et profilés divers après cisaillage à chaud, sont souvent empilés les uns sur les autres sur le sol même de la halle de laminage où, pendant le refroidissement très lent de la masse, la chaleur a le temps de s'y répartir uniformément et de donner des effets analogues à ceux d'un recuit.

Le recuit n'est pas seulement nécessaire pour régulariser les effets du forgeage, il s'impose également pour corriger l'écrouissage des pièces qui ont été soumises à un travail de déformation à froid ; *étirage à froid pour tubes par poinçons et matrices, laminage à froid, étirage des tubes ou des fils à froid à la filière,* etc...

On définira ultérieurement ce qu'il faut entendre par *écrouissage.*

Ce recuit exécuté au rouge cerise clair, soit après chaque passe, soit après un nombre variable de passes, suivant la nature des fabrications,

se fait dans des fours à recuire ordinaires dans lesquels on s'efforce de réaliser une atmosphère qui ne soit pas oxydante, car les pièces soumises à des travaux à froid, ayant généralement une épaisseur assez faible, exigent qu'on réduise au minimum la perte par oxydation. D'un autre côté, comme on ne peut éviter la formation d'oxyde, le recuit sera toujours suivi d'un décapage destiné à rendre nette la surface de l'objet pour faciliter d'une part son passage dans les matrices, filières, etc... et à empêcher, d'autre part, que l'incrustation de l'oxyde de fer dans le métal ne lui enlève son homogénéité.

Le recuit des fils venant de la filière ou d'autres menus objets s'opère d'ordinaire en vase clos pour les raisons que nous venons de donner : les marmites servant à cet usage sont des cylindres en fonte fermés par un couvercle boulonné, chauffées par la flamme directe du charbon brûlé sur de petites grilles ou placées sur la sole d'un four à réverbère à la houille ou au gaz.

Les fils sont placés en rouleaux à l'intérieur des marmites souvent remplies de sable ; le sable recouvrant complètement le métal le préserve encore plus sûrement de l'oxydation.

On voit par ce qui précède quelques moyens employés pour recuire ; nous ne saurions entrer dans le détail des artifices plus ou moins variés en usage dans les forges suivant le genre des objets en fabrication.

Ici se termine la première série des traitements métallurgiques auxquels on soumet la plus grande partie des objets de fabrication commune en fer ou en acier, mais pour ceux qui doivent résister à de grands efforts (*tubes de canons, frettes, corps d'obus, certains obus, arbres de transmission*, etc...) ou résister à l'usure ou à la pénétration (*outils, plaques de blindages.....*) etc., etc., d'autres traitements métallurgiques complémentaires sont nécessaires ; ce sont la *trempe* et le *revenu après trempe*. Nous allons les étudier dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

LA TREMPE

« *La trempe consiste à faire passer plus ou moins rapidement un* « *métal d'une température déterminée à une température inférieure en* « *le plongeant dans un bain fluide* » (Commission des méthodes d'essai).

Article Ier. — Effets produits par la trempe

Les effets de la trempe dépendent essentiellement de l'importance de *trois facteurs* principaux (1) :

1° *De la composition chimique du métal ;*

2° *De la différence de température du bain de trempe et de la pièce trempée ;*

3° *De la conductibilité thermique et de la capacité calorifique du milieu où l'on trempe.*

C'est en agissant sur *l'état physico-chimique* et sur la *structure des métaux* de la famille du fer que la trempe transforme les propriétés mécaniques de ces métaux d'après un mécanisme que nous expliquerons plus tard.

La constatation des propriétés mécaniques d'un métal se fait à l'aide d'essais pratiqués sur des barreaux de forme appropriée prélevés dans le métal à apprécier : ce sont les *essais à froid.* Sans anticiper sur l'étude spéciale que nous consacrerons ultérieurement aux essais, il est toutefois opportun de donner dès maintenant sur ce sujet quelques notions afin de pouvoir se rendre compte des transformations accomplies par cet important traitement métallurgique.

Ces essais consistent spécialement en *essais au choc, à la flexion* et surtout à la *traction.*

Les essais de traction étant les mieux connus et les plus simples, on a été tout naturellement conduit à les considérer comme les plus propres à donner la valeur d'un métal.

Or, au point de vue théorique, rien ne peut justifier que ces essais soient aptes à fixer d'une façon certaine sur la résistance du métal à des efforts statiques d'une tout autre nature ou à des efforts dynamiques. Il faut simplement les considérer comme des moyens de comparer des produits de même espèce et soumis aux mêmes épreuves.

Ajoutons toutefois que les diverses résistances à la rupture par compression, par cisaillement, etc... sont considérées plus ou moins légitimement comme *des fonctions* des résistances déterminées par les essais

(1) Il est expressément sous-entendu qu'il ne s'agit que d'aciers au carbone avec traces de corps étrangers ; la trempe des aciers dits *spéciaux* sera étudiée à *la fin de ce Traité.*

mentionnés ci-dessus : on les déduit approximativement de ces dernières pour un métal donné.

Il reste entendu que, sauf mention contraire, quand il sera parlé de la résistance à la rupture, *ce sera de la résistance à la rupture par traction* qu'il s'agira.

Cela posé, et afin de fixer les idées, il importe de définir les caractéristiques fondamentales de l'essai de traction :

LIMITE ÉLASTIQUE E	CHARGE DE RUPTURE R	ALLONGEMENT POUR CENT A 0 0
C'est la charge maximum exprimée en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive que peut supporter le barreau sans éprouver de déformation permanente.	C'est la charge maximum exprimée en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive, qu'a supportée le barreau avant de se rompre.	C'est l'allongement pour cent rapporté à la partie du barreau comprise entre 2 traits de repère préalablement marqués sur le barreau avant l'essai et fixant sa longueur type.

Ces définitions étant admises, voyons maintenant comment se différencient les effets principaux produits par la trempe sur les propriétés des fers et des aciers.

Ces effets sont de nature bien différente : les uns caractérisent les trempes dites *positives*, les autres caractérisent les trempes dites *négatives*.

Cette distinction récente, due à M. *Osmond*, est une conséquence naturelle des théories qu'il a proposées pour expliquer le mécanisme de cette importante opération métallurgique. Nous y reviendrons longuement dans la suite ; pour le moment cette classification nous sera utile pour la clarté de notre exposé didactique.

I. — *Trempes positives.*

Et d'abord, procédons par ordre :

1° Pendant longtemps on a rattaché à l'opération de la trempe l'idée

exclusive d'une *opération durcissante* résultant de son application, à l'origine, à des instruments d'acier dur pour leur faire acquérir *le fil et le tranchant*.

Par dureté, il faut entendre la propriété que possèdent les métaux de subir de petites déformations sous l'action de grands efforts.

2° L'expérience apprit ensuite, et les essais rationnels exécutés à l'aide de machines appropriées montrèrent à l'évidence, que E, R *ainsi que la résistance au choc étaient augmentées*. On constatait en même temps *une diminution de* A 0/0.

3° On remarqua, en outre, que la trempe donnait de l'*homogénéité* aux métaux de la famille du fer ; leur texture cristalline ou du moins composée de grains assez gros devenait *amorphe* après la trempe ou tout au moins composée de grains extrêmement fins.

Ce sont ces trois effets qu'on a surtout demandés à la trempe, effets aperçus confusément autrefois, distingués nettement par la sidérurgie moderne et caractérisant à des degrés divers, selon les conditions de l'expérience, les trempes appelées *positives* par *M. Osmond*. C'est aux aciers qu'elles s'appliquent, c'est d'eux qu'en langage courant on peut dire qu'ils ont la faculté de « *prendre la trempe* ».

II. — *Trempes négatives.*

Ainsi l'expression de « *prendre la trempe* » implique en langage courant qu'on a affaire à une trempe *positive* donnant, plus ou moins exaltées, les propriétés ci-dessus définies.

Nous avons dit plus haut que c'est parce que la trempe agit sur l'état physico-chimique et sur la structure des fers et des aciers, d'après un mécanisme que nous étudierons plus loin, qu'elle modifie les propriétés de ces métaux. On conçoit que si l'action de transformation due à la trempe n'est que partielle et ne *s'exerce que sur la structure même*, on n'obtiendra plus les mêmes propriétés caractéristiques des trempes dites *positives*.

Supposons que par une trempe convenable réalisée par une valeur déterminée à cet effet des trois facteurs essentiels dont dépendent les effets de toute trempe (*facteurs énumérés au début de cet article*) on agisse simplement sur la structure du métal. En opérant ainsi, on aura entravé les arrangements cristallins s'organisant dans tout refroidisse-

ment lent ; l'acier ou le fer ainsi trempés ne seront guère plus résistants que s'ils avaient été refroidis plus lentement mais auront acquis un allongement supérieur.

Tels sont les résultats expérimentaux acquis à la suite de trempes spéciales que nous définirons plus loin.

Comme on a pris l'habitude, dit M. *Osmond*, de relier indistinctement le mot *trempe* à l'idée d'une opération qui rend l'acier dur et fragile et que cependant on fabrique aujourd'hui des *aciers qui ne trempent pas* au sens usuel du mot, on voit qu'il devient nécessaire d'ajouter à ce mot des qualificatifs qui le définissent et fassent disparaître des confusions d'idées qui n'ont été que trop fréquentes.

M. *Osmond* propose les termes de *trempes positives* pour celles qui durcissent l'acier et de *trempes négatives* pour les autres.

Ces trempes négatives, dont la caractéristique exclusive est d'agir sur la structure du métal, peuvent être réalisées avec les aciers et sont les seules que peuvent prendre les fers ou aciers extra-doux fondus.

Ainsi quand on dit que le fer ou les aciers extra-doux *ne prennent pas la trempe*, on entend par là que la dureté, la résistance à la rupture par traction ou au choc et la limite élastique ne sont pas augmentées par cette opération ; ce qui ne veut pas dire que la trempe ne produise aucun effet puisque la texture de ces métaux a été profondément modifiée.

III. — *Modifications d'équilibre produites par la trempe proprement dite.*

Nous abordons ici un sujet peu connu, difficile à relier avec les notions qui précèdent et d'une importance capitale à considérer pour les conditions de résistance des métaux trempés. La trempe, surtout quand elle est *positive*, détermine dans les pièces métalliques des efforts de tension ou de compression souvent assez grands pour amener des déformations permanentes ou même la rupture.

Lorsqu'on trempe une pièce pleine, les couches intérieures qui sont restées à une température élevée subissent leur retrait avec un retard notable sur les couches extérieures.

Elles tendent à entraîner celles-ci qui ne peuvent les suivre parce qu'elles sont devenues rigides et ne sont plus susceptibles que de l'al-

longement du métal à la température du bain. Il en résulte donc une compression des couches extérieures et une tension des couches intérieures.

Si le métal est doux et possède à basse température un allongement suffisant il y a déformation élastique ou permanente. Si le métal est dur, possède peu d'allongement et que les effets produits par la trempe soient considérables, il y a séparation et la *pièce tape*. Cet effet se produit surtout vers les points où le refroidissement a été plus rapide, c'est-à-dire aux angles vifs, aux pointes. Ces points étant, en effet, devenus rigides les premiers subissent des efforts plus considérables ; en outre, ils sont plus énergiquement trempés et conservent moins d'allongement. Ces deux causes se réunissent pour amener la rupture en ces points.

Pour donner une idée de l'énergie des efforts qui s'exercent après trempe, nous citerons l'exemple suivant :

Un obus de rupture en acier chromé, trempé à l'eau à l'ogive et posé debout sur le culot se brisa tout à coup suivant une surface de révolution *a*, *b*, *c*, *d*.

La pointe *a*, *b*, *c*, *d*, *p* pesant une vingtaine de kilos fut projetée avec une telle violence qu'elle alla crever la toiture de l'usine à plus de 10 mètres de hauteur.

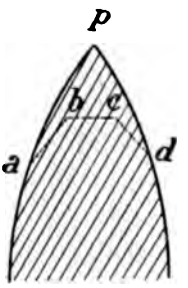


Fig. 182.

Lorsqu'il n'y a pas rupture, il existe néanmoins un état d'équilibre instable, et il est à craindre que des causes extérieures venant à agir dans le même sens que les forces existantes ne viennent provoquer une tapure susceptible d'amener des accidents, et en tout cas, de perdre la pièce. Un changement de température suffit quelquefois, et le cas s'est présenté souvent.

C'est ce qui explique une condition de recette adoptée pour les obus de rupture et qui consiste à les chauffer à 100° dans l'eau bouillante; puis à les plonger brusquement dans l'eau à 20°.

On s'assure ainsi qu'un changement de quelques degrés dans la température sera insuffisant pour faire taper plus tard le projectile.

Il arrive souvent que la trempe donne lieu à des déformations permanentes. Ce fait se produit surtout pour les pièces de grande longueur par rapport à leur section et qui ont subi un chauffage ou un refroidissement inégal en leurs divers points ou bien pour les pièces qui

offrent des parties épaisses et des parties minces, ou encore pour celles dont la texture n'a pas été rendue au préalable suffisamment homogène. Ces pièces sont alors voilées à la trempe.

Article 2. — Pratique de la trempe

Il faut, pour tremper, chauffer le métal à une température variant, suivant la nature de l'acier, du rouge cerise naissant au rouge cerise très clair.

Nous préciserons plus tard dans quelles limites de température il faut opérer aussi bien pour le forgeage que pour le recuit après forgeage et pour la trempe. Contentons-nous pour le moment de ces indications générales.

I. — *Réchauffage pour la trempe*

Nous ne reviendrons pas sur la description des divers types de fours à réchauffer qu'on peut utiliser: on a dû cependant en compléter la série par de nouveaux types nécessités par la longueur de certaines pièces à tremper, telles que tubes à canons de gros calibres, arbres de transmission, etc...

Ces types spéciaux comprennent les fours horizontaux et les fours verticaux.

Nous citerons parmi les fours horizontaux : ceux *à grille ordinaire* analogues aux fours à recuire, ceux *à gaz d'éclairage* dans lesquels des deux côtés de la pièce à réchauffer et à hauteur de son axe se trouve une série de chalumeaux et ceux *dits de circonstance*.

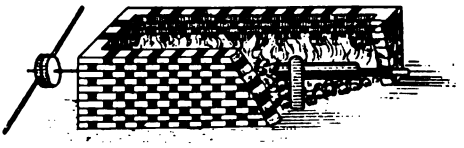


Fig. 183. — Chauffage horizontal avant trempe.

Le four est constitué tantôt par de petits murs parallèles en briques à claire-voie pour activer le tirage et soutenus par des montants en fer, tantôt par de forts grillages en fer qu'on peut dresser ou enlever rapidement.

On allume avec un peu de charbon de bois et de coke, puis on charge peu à peu le combustible en activant le chauffage suivant les

diverses épaisseurs de la pièce à chauffer. On imprime aux arbres, tubes de canons, etc... un mouvement de rotation autour de leur axe afin d'uniformiser la température.

Avec les fours horizontaux les pièces de grande longueur sont su-

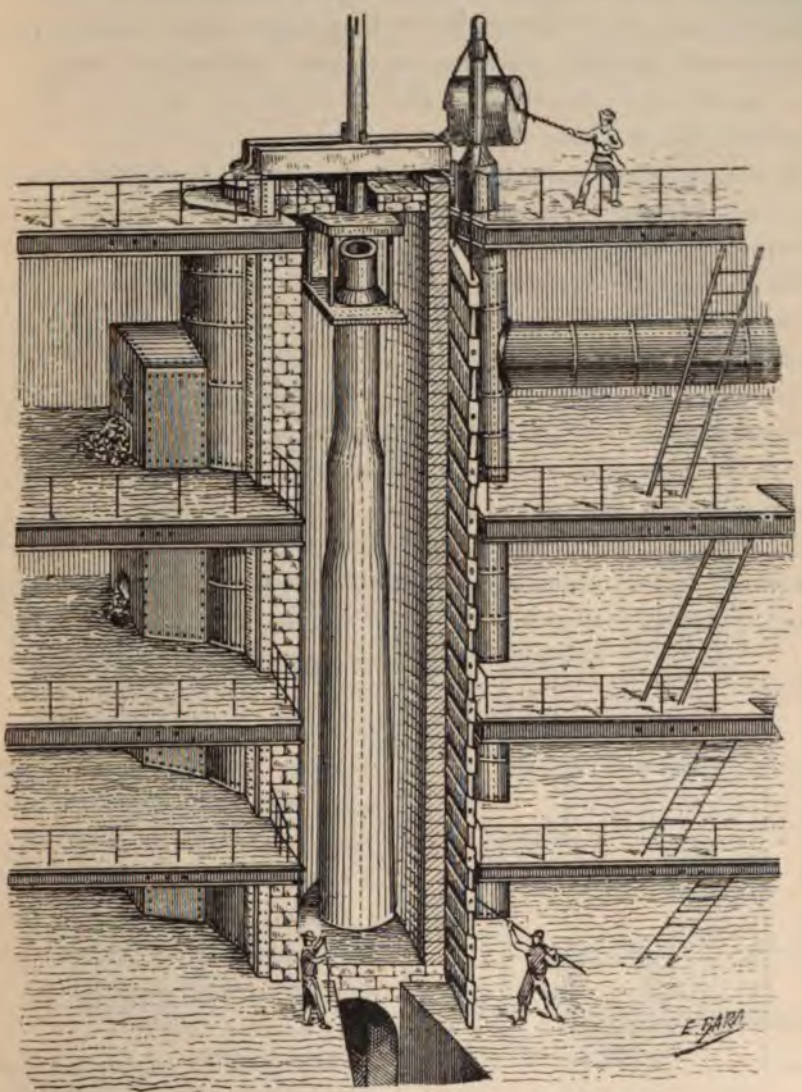


Fig. 182.

jettes à se voiler, le chauffage y est irrégulier, car la rotation y est

difficile à réaliser; enfin, quand on utilise des fours de circonstance, il est mauvais de chauffer au contact du combustible.

Pour ces motifs on utilise dans les usines, pour le chauffage avant trempe des pièces de grande longueur, des fours verticaux.

L'usine d'*Unieux* (Loire) emploie depuis peu un four vertical avec chalumeaux à gaz remarquablement aménagé; mais le dispositif le plus général consiste à disposer en certains points de la hauteur du four des foyers à grille dont on activera la marche, de façon à donner aux pièces un chauffage régulier.

Pourtant, cette régularité n'est pas parfaite: les points qui sont vis-à-vis des carneaux atteignent une température plus élevée, surtout lorsque ces carneaux ne sont pas répartis uniformément sur la double enveloppe intérieure du four, mais sont simplement situés dans un plan vertical passant par l'axe de l'appareil perpendiculairement aux foyers.

Les grandes installations de trempe de *Saint-Chamond et du Creusot* ont été organisées de façon à obvier à ces divers inconvénients.

Nous donnons plus loin à titre d'exemple, et pour mémoire, le type d'installation des usines du *Creusot*.

Nous remarquerons encore pour terminer ces considérations générales que quelques installations de trempe sont organisées sous des hangars à l'abri du vent et des courants d'air, mais d'autres sont encore en plein air. Cette dernière disposition est mauvaise, car quand on sortira la pièce du four pour la tremper, un courant d'air même faible pourra amener un refroidissement inégal de cette pièce et la cintrer.

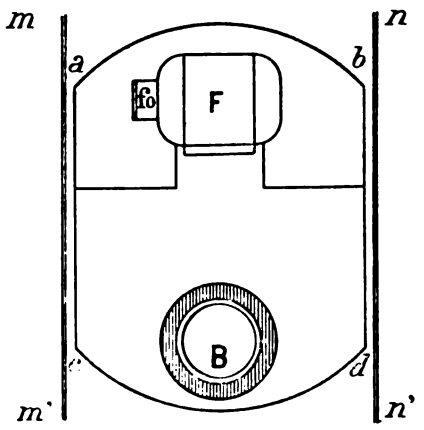


Fig. 185.

Cela dit, prenons comme exemple d'installation de grande trempe celle du *Creusot* destinée aux canons de gros calibres.

Cette installation comporte une grande fosse *a b c d*, profonde de 20 mètres, sur le fond de laquelle est édifié un four vertical F flanqué de quatre étages de foyers *fo*.

En B est creusé un puits pour bâche à huile ou à eau de 20 mètres de profondeur également.

Un pont roulant peut se déplacer sur des rails *mm'*, *nn'* disposés sur le sol et longeant les grands côtés de la fosse. Ce pont est muni d'une machine destinée à le mouvoir et à faire les manœuvres nécessaires pour déplacer la pièce à tremper.

Le tube de canon est suspendu verticalement à une griffe et descendu

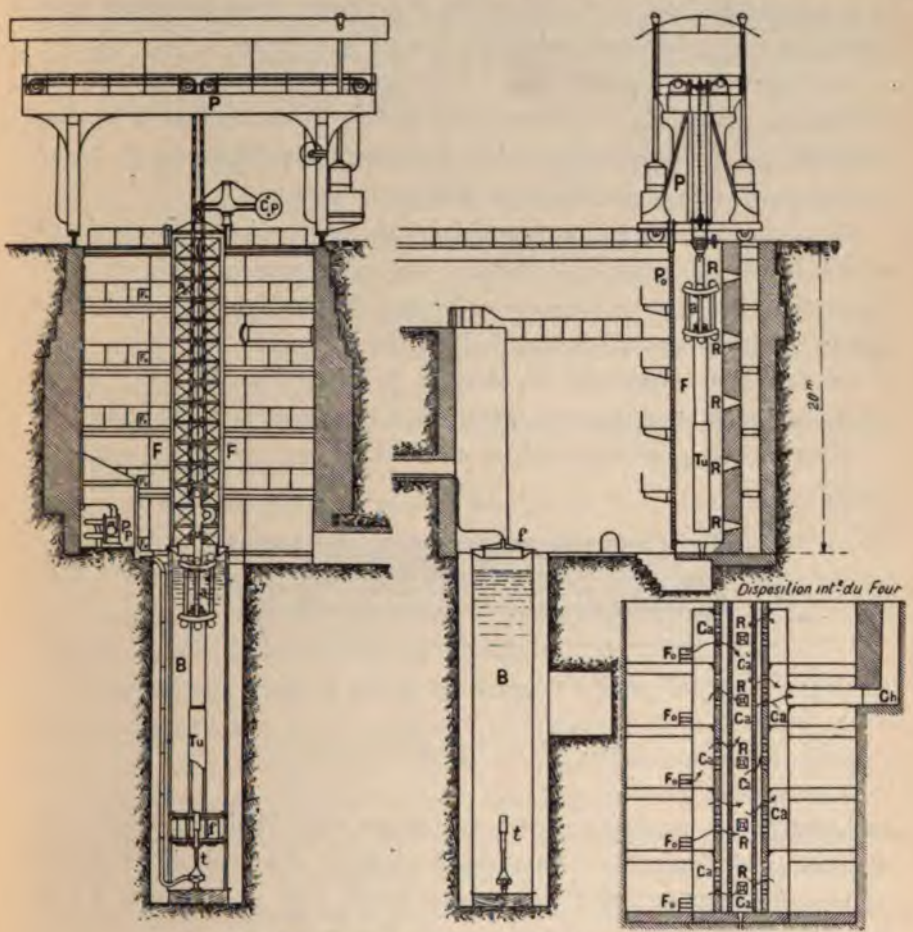


Fig. 186. — Fosse à tremper les gros canons (Creusot).

F, four. — *Po*, porte articulée. — *Cp*, contre-poids de la porte. — *Fo*, foyers. — *Ca*, carneaux. — *R*, regards. — *Ch*, cheminée. — *B*, bâche à huile. — *f*, flotteur. — *Pp*, pompe à injecter de l'eau. — *t*, tube d'injection. — *P*, pont roulant. — *a*, appareil de suspension du tube. *Tu*, tube de canon.

dans la fosse. On ouvre alors la porte P*o* du fou équilibrée par le con-

tre-poids *Cp* et l'on y introduit le canon. Les foyers sont allumés et les flammes se répandent dans une gaine, entre les deux enveloppes du four. L'enveloppe intérieure est munie de nombreux carneaux étagés de haut en bas.

Pour arriver à chauffer la pièce uniformément en tous ses points, celle-ci reçoit du pont roulant deux mouvements : le premier consiste en un va-et-vient de haut en bas, le second en un mouvement de rotation autour de l'axe de la pièce. De cette façon, tous les points peuvent être successivement présentés devant le carneau le plus proche.

Des regards pratiqués à tous les étages permettent d'apprécier la couleur du métal. En se plaçant sous le four et en regardant suivant l'axe du canon, on remarque plus facilement les différences de teinte qui peuvent se produire dans les différentes zones.

On pousse plus ou moins chaque foyer de manière à obtenir un chauffage bien régulier. Quand le rouge cerise est obtenu partout, on ouvre la porte du four, et on manœuvre le pont de manière à transporter le canon verticalement au-dessus de la bâche B.

On fait alors descendre rapidement la pièce dans la bâche et on l'y laisse pendant plusieurs heures jusqu'à complet refroidissement.

Il est bon de prendre certaines précautions pour éviter les accidents

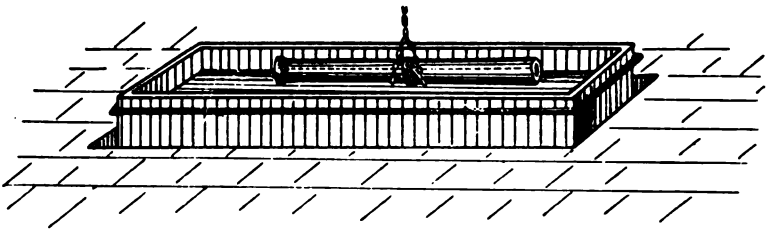


Fig. 187. — Trempe horizontale.

qui peuvent se produire quand on trempe dans l'huile. Celle-ci s'enflamme généralement, et l'on aurait à craindre des projections dangereuses si l'on ne fermait l'orifice de la bâche avec un couvercle à bascule dès que la pièce y est entièrement descendue.

La flamme ainsi privée d'air s'éteint rapidement et l'on réalise une notable économie d'huile.

II. — *Liquides employés pour la trempe.*

Suivant la nature du liquide employé pour la trempe, les effets de celle-ci varient :

Une trempe est d'autant plus énergique qu'elle est plus *positive*, c'est-à-dire que le durcissement, R et E ont d'autant plus augmenté et, que A 0 0 est devenu d'autant plus petit. On sait, d'autre part ce qu'il faut entendre par *trempe négative*.

A. — *Emploi de l'huile.* — La sidérurgie moderne a employé presque exclusivement l'huile jusqu'à ces dernières années pour tremper la plus grande partie des pièces, sauf certains outils.

Et cependant l'huile présente plusieurs inconvénients :

1° C'est un liquide cher, soit à cause de la dépense première à faire pour emplir les immenses cuves, soit pour renouveler l'huile vaporisée ou brûlée par les diverses trempes.

2° Son emploi n'est pas sans danger, car on peut avoir des projections à haute température.

3° On ne peut pas faire varier l'énergie de la trempe en modifiant uniquement la température de l'huile. D'après le commandant *Couhard* (1), il faudrait attribuer ce résultat à la formation sur la surface du métal d'une pellicule mauvaise conductrice résultant de l'altération de l'huile au contact de l'acier au rouge.

Pour les très grosses pièces la trempe à l'huile est positive dans les couches périphériques et négative à peu de distance de la surface, car pour les couches internes la vitesse de refroidissement est simplement suffisante pour agir sur la structure, sans augmenter sensiblement R, E, ainsi que la résistance au choc par modification physico-chimique du métal, ainsi qu'on l'expliquera plus tard. Cet effet de la trempe à l'huile sur les grosses pièces de forge a été très nettement signalé il y a longtemps déjà par le commandant *Couhard*, ainsi que le relate un mémoire de M. *Osmond*. Pour les petites pièces en acier dur, il est acquis que la trempe à l'huile est une trempe positive.

Les matières grasses solides, *suifs et graisses* se rapprochent de l'huile par leur nature, mais présentent cette particularité intéressante

(1) Professeur du cours de sciences appliquées à l'Ecole d'application (1881-1891).

[illegible] premier exemple de l'utilisation, pour la trempe, [illegible] de fusion.

1. — [illegible] de l'eau. — La trempe à l'eau est un procédé d'une [illegible] elle peut être positive, plus ou moins négative, [illegible] et la température du bain que l'on [illegible] au-dessous, grâce à l'addition [illegible]

[illegible] proportionnelles à R qui représentera l'énergie de la trempe. Dans l'huile, la courbe figurative de l'énergie de trempe peut être représentée, à très peu près, par une droite parallèle à l'axe des abscisses; dans l'eau, on a une courbe coupant la [illegible] à peu près égale à 70°. Il en résulte que [illegible] vers 70° est analogue à la trempe à [illegible]

[illegible] l'eau de la bâche de telle sorte [illegible] on pourra obtenir tels et tels effets [illegible] Aujourd'hui que ces résultats sont connus [illegible] la trempe à l'huile pour les grosses pièces [illegible] l'eau réchauffée plus ou moins par [illegible] spéciaux dans le détail desquels nous [illegible] bientôt sous peu le liquide normal de trempe.

Employée [illegible] l'eau n'avait pu être conservée pour les grosses pièces comme liquide de trempe car, *pour éviter les tapures*, il y a une certaine rapidité limite de refroidissement, pour un métal donné et pour un certain volume des pièces, qu'on ne saurait dépasser.

Cependant le colonel d'artillerie *Caron* avait proposé, dès 1873, la trempe à l'eau chaude ou bouillante pour les outils; au lieu de les tremper comme autrefois exclusivement à l'eau froide et de les réchauffer légèrement ensuite ainsi qu'il est le plus souvent nécessaire, comme on le verra plus loin, il réunissait dans une seule opération la trempe et le léger réchauffage après trempe (*revenu*). La grande industrie eût pu ai-

sément bénéficier d'un pareil résultat si, à l'époque, cette question avait été à l'ordre du jour.

Appliquée aux aciers doux, la trempe à l'eau bouillante deviendrait presque toujours négative ; pour la trempe des outils proposée par *Caron* il ne pouvait en être ainsi parce que ces aciers sont constitués par des nuances dures ou très dures.

Le colonel Caron, nous dit M. Osmond, avait annoncé du reste, à l'époque, que tous les procédés de trempe possibles ne sont que des moyens de faire varier la vitesse du refroidissement.

C. — *Quelques citations par M. Osmond.* — Nous avons beaucoup emprunté au beau mémoire de M. *Osmond* sur les « *nouveaux procédés de trempe* », nous ne saurions cependant passer sous silence les quelques citations vraiment caractéristiques données par ce savant Ingénieur; elles sont fort suggestives.

« La trempe classique, dans l'eau à la température ordinaire, remonte « certainement aux premiers débuts de la sidérurgie et se rattache aux « légendes mythologiques.

« Les *Cyclopes* la pratiquaient :

« . . . . . alii stridentia tingunt
« Æra lacu ; . . . . . .

Virg., *Georg.*, IV, 173-174.

« Les anciens attribuaient, non sans quelques motifs, une grande « importance à la qualité des eaux : certaines localités qui n'étaient pas « des centres de production, étaient renommées pour la trempe des « aciers; on y trouvait sans doute des eaux courantes, régulièrement « froides en toutes saisons et l'influence de la température de l'eau « n'était pas inconnue.

« *Shakespeare* y fait une curieuse allusion : l'épée d'*Othello* a été « trempée dans les ruisseaux glacés :

« *It is a sword of Spain, the ice brook's temper.....*

« La trempe à l'huile était déjà pratiquée dans l'antiquité :

« *Pline* en fait mention dans un passage bien connu et dit qu'on « l'employait pour les petites pièces que l'eau eût rendues trop fragiles :

« *Tenuiora ferramenta oleo restinguimos est, ne aquâ in fragilitatem durentur.* »

On ne saurait mieux dire.

Nous devons à la vérité d'ajouter qu'à côté de faits d'observation exactement rapportés, *Pline* donne des conseils métallurgiques peu aptes à faire progresser l'art de son temps.

Cependant, il n'est pas moins avéré que les anciens avaient trouvé, pour la trempe des petits outils, une solution bien équivalente à celle de *Caron*.

D. — *Trempes très vives et très douces.* — Dans un brevet de 1887, le *Creusot* fonde un procédé de trempe sur l'utilisation de la chaleur latente de fusion du milieu, ce qui permet de maintenir constante la température de ce milieu, assure la rapidité de l'opération et l'obtention de résultats énergiques au point de vue des phénomènes de trempe, lorsque cela est nécessaire.

MM. *Schneider et Cie* indiquent notamment :

1°) Un bain salin en mélange avec de la glace ou un mélange réfrigérant.

2°) Un bain d'eau en mélange avec de la glace ou un mélange réfrigérant.

3°) Un milieu solide, tel que la glace, fusible au contact de la pièce.

De pareils mélanges ne sauraient être applicables à des aciers d'une certaine dureté sous peine de les voir inévitablement *taper*, mais ils doivent exercer de très grands effets sur les métaux doux et extra doux.

Enfin nous pourrions citer comme liquides donnant après l'eau des trempes d'énergie croissante et d'un usage plus courant que les mélanges précédents : l'eau salée, l'acide sulfurique, le mercure, etc... liquides spécialement employés pour certains outils, petits ressorts à très faible section, etc...

La trempe dans les nitrates alcalins proposée par le *Creusot* ou celle dans les alliages fusibles, dont on peut faire varier très largement les points de fusion avec les proportions des constituants, font immédiatement suite à l'huile. Ces trempes conviennent aux aciers sujets aux tapures ; sauf pour les petites pièces en acier très dur, elles seront *négatives*.

L'idée des alliages fusibles (*plomb*, *plomb et étain*, *étain et bismuth*) pour les aciers à outils, les seuls qui fussent alors connus est due à Th. *Gill* en 1818.

Il appartenait à la Cie des Forges de *Châtillon* et *Commentry*, en

1887, de vulgariser les procédés de trempe dans les bains métalliques pour les grosses pièces de forge.

Par l'immersion dans un bain de plomb fondu on obtient une texture plus homogène en évitant la production de toute tapure apparente ou interne. Cette trempe au plomb permet d'améliorer énormément le grain des moulages d'acier doux et donne aux aciers forgés (*plaques de blindage, obus de rupture*, etc...) une texture tout à fait régulière. Les pièces chauffées au rouge cerise clair sont immergées dans le bain de plomb maintenu à une température continuellement uniforme par l'introduction dans le bain de saumons de plomb, en cours d'opération ; on laisse ces pièces s'y refroidir.

On pourra ensuite, si besoin est, et selon la nature des pièces, procéder à une trempe positive dans laquelle le métal sera mieux préparé pour résister aux tapures puisqu'il aura été rendu beaucoup plus homogène et aura acquis un plus grand allongement.

Enfin M. *Osmond* signale les *bains de zinc;* ce métal est, à volume égal, moins coûteux que le plomb et ne présente pas, au point de vue de l'hygiène, les mêmes dangers ; son point de fusion est plus élevé, 412° au lieu de 335° ; mais comme sa capacité calorifique est triple, il est probable que l'effet d'une trempe au zinc, le volume du bain restant le même, serait peu différent de celui d'une trempe au plomb.

« *Les nouveaux bains de trempe que proposera l'avenir ne seront pro-*
« *bablement, quelques mystérieuses vertus que puissent leur prêter leurs*
« *inventeurs, que les succédanés plus ou moins pratiques de bains*
« *déjà connus. — Osmond.* »

III. — *De quelques trempes spéciales.*

A. — *Trempe intérieure.* — On a eu l'idée d'utiliser les effets de tension ou de compression, souvent assez grands, que détermine la trempe dans les pièces métalliques pour produire dans les couches internes des pièces forées, tubes à canon, arbres, etc., un état d'équilibre analogue à celui que leur donnerait un frettage.

Il suffit pour cela de tremper ces tubes par l'intérieur, ou plus énergiquement par l'intérieur que par l'extérieur.

Les couches extérieures ne prennent leur retrait que quand les couches internes sont déjà devenues rigides ; elles compriment donc ces dernières, tandis que l'extérieur demeure en tension.

Il est facile de mettre en lumière l'action de ces forces en trempant deux anneaux, l'un A par l'intérieur, l'autre B par l'extérieur et en les fendant après coup suivant un plan méridien.

Les anneaux s'ouvrent et prennent les formes indiquées par les figures ci-dessous :

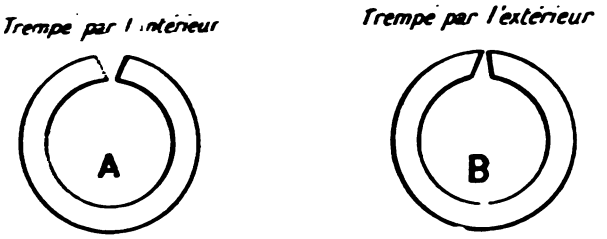


Fig. 189. Fig. 190.

La circonférence extérieure du premier, qui était en tension, montre sa propension à s'allonger. C'est l'inverse pour l'anneau B.

La trempe, conduite comme on le fait le plus souvent et qui refroidit à la fois l'intérieur et l'extérieur, met l'âme et l'extérieur en compression pendant que les couches intermédiaires restent en tension.

Il ne nous appartient pas de donner le détail des installations plus ou moins compliquées qui ont été essayées pour la trempe intérieure; c'est à un cours de fabrication des bouches à feu qu'une pareille description ressortit. A notre avis, et malgré la valeur des considérations qui précèdent, nous ne pensons pas que l'opération soit bien pratique d'une part et puisse donner des résultats bien certains d'autre part, à cause de la difficulté même de réaliser un refroidissement régulier tout le long de l'âme : on pourra quelquefois avoir ainsi créé un état d'équilibre, sinon dangereux, du moins aussi instable que celui obtenu par la trempe ordinaire lorsqu'elle est très vive.

B. — *Double trempe.* — Les efforts de tension ou de compression dus à la trempe amènent d'autant plus facilement des tapures ou des déformations permanentes que le métal est moins homogène. On peut se mettre à l'abri, dans une grande mesure, de cette cause d'accidents en pratiquant la double trempe, qui consiste à faire subir à la pièce une trempe négative à l'huile ou au plomb fondu, avant de lui donner, par une trempe définitive et plus énergique, les qualités de dureté et de résistance qu'elle doit avoir finalement.

Quand les aciers ne sont pas sujets à taper la double trempe est également employée avec succès pour l'amélioration maxima de la texture.

La première trempe ne sert donc qu'à rendre le métal plus homogène, les tensions ou compressions développées par la seconde trempe pouvant se répartir alors d'une manière plus uniforme.

C'est ainsi que certaines usines trempent au plomb les plaques de blindage et les obus de rupture avant de les tremper à l'huile ou à l'eau : les outils en acier très dur sont souvent aussi traités de cette façon.

La double trempe, recommandée pour la 1re fois par M. *Walrand*, vulgarisée par le capitaine d'artillerie *Ply* (1) à la manufacture d'armes de Saint-Etienne, a fait l'objet d'une étude spéciale de M. A. *Le Chatelier* à la suite de laquelle elle a été systématiquement utilisée par la marine pour les pièces de machine.

Ce traitement de l'acier, employé depuis pour diverses pièces dans le service de l'Artillerie, tend à se répandre de plus en plus dans les usines.

On ne procède cependant pas toujours comme il vient d'être dit : pour certaines pièces auxquelles il faut donner des duretés fort inégales, on commence par les chauffer uniformément au rouge cerise clair, puis on trempe à l'eau d'abord la région à transformer énergiquement, le reste de la pièce étant soigneusement mis à l'abri du contact du liquide ; enfin, au bout d'un temps assez court on plonge toute la pièce dans l'huile.

Cette trempe est celle qui est surtout employée aujourd'hui pour les obus de rupture en acier chromé. La trempe initiale partielle durcit l'ogive et en transforme le grain, la trempe finale transforme uniquement la texture de la partie cylindrique ménageant vers la naissance de l'ogive une région de transition, car l'obus est loin d'être complètement refroidi là où il a été partiellement trempé. On aura par suite une pointe très dure se reliant par une région moins trempée à la partie cylindrique bien moins cassante ; ce qui permettra au projectile de ne pas se briser quand la pointe aura frappé le blindage.

Quelquefois la double trempe est exécutée comme ci-dessus mais *sur la pièce tout entière*, l'énergie différente des trempes étant obtenue

(1) Le capitaine *Ply* trempait à l'huile, puis à l'eau, les fraises à profil compliqué employées pour l'usinage des pièces d'armes.

non par le choix des liquides mais par la réalisation de températures différentes de chauffage, et cela quand les aciers sont peu sujets à taper.

La 1re trempe peut se faire au jaune, la seconde au rouge sombre; les températures devront être d'autant plus basses que l'acier en traitement est plus dur : la trempe à l'eau vers 70° paraît donner les meilleurs résultats. En opérant comme il vient d'être dit, on peut considérer la 2e trempe comme une opération tendant surtout à diminuer la fragilité acquise par les aciers énergiquement trempés ; elle remplit alors le but qu'on recherche par le recuit à basse température, appelé *revenu*, dont il sera question plus loin.

C. — *Trempe par compression.* — Ce procédé dû à M. *Clémandot* consiste à faire acquérir à l'acier les propriétés que lui donne la trempe par une *compression à chaud* prolongée jusqu'au delà du point où les molécules ne peuvent plus se mouvoir.

M. *Clémandot* a fait une série d'expériences sur des aciers coulés en lingots, martelés ou laminés. Après les avoir réchauffés au rouge cerise clair, il les a soumis à l'action de la presse hydraulique poussée jusqu'à 1000, 2000 et même 3000 kil. par cent. carré. Les ayant alors laissés se refroidir entre les plateaux de la presse, il a constaté des modifications caractérisées par une finesse de grain beaucoup plus grande et par une dureté et une résistance à la rupture bien plus considérables, surtout lorsqu'il s'agissait d'aciers assez fortement carburés. Il a donc obtenu comme une véritable trempe, avec tous les caractères que la trempe par immersion dans des bains appropriés produit ordinairement.

Les résultats, bien que fort intéressants, n'ont pas été encore considérés comme suffisants pour faire aux procédés de compression une place décisive dans les opérations de la métallurgie pratique. Il semble toutefois qu'il y ait entre les effets produits par la compression à chaud et ceux produits par tout travail de déformation à froid (*écrouissage*) une certaine analogie ; mais, ainsi que nous le verrons, ces phénomènes spéciaux sont encore fort obscurs et nous croyons qu'il y a là un vaste champ d'exploration pour les Ingénieurs sidérurgistes.

Remarque. La trempe des outils sera étudiée après que nous aurons défini le *revenu*, car pour la plupart d'entre eux ces deux opérations sont intimement liées l'une à l'autre.

D. — *Trempe après cémentation.* — On pratique quelquefois la trempe sur des pièces brutes de forge en acier auxquelles on donne préalablement une plus ou moins grande dureté par *cémentation :* on les enferme, à cet effet, dans des caisses hermétiquement closes contenant du cément les entourant de toutes parts. Après un temps plus ou moins long à la température du rouge, les pièces sont retirées et trempées dans l'huile.

Quelquefois on ne cémente que des portions de pièces avant la trempe, à l'aide de *prussiate de potasse* ou d'une autre matière très carburée dont on saupoudre le métal à chaud. Ce procédé ne donne évidemment qu'une dureté absolument superficielle utile en certains cas.

La cémentation telle qu'elle vient d'être définie est d'un usage courant dans la fabrication des petites pièces d'armes à durcir par la trempe.

Pour ce qui concerne la fabrication des plaques de blindage on a dû renoncer depuis longtemps à couler de grandes masses d'acier dur exposées à taper dans les différents traitements calorifiques, on a préféré couler des masses d'acier relativement doux auquel on donne la dureté par des trempes appropriées. Il y a lieu d'ajouter, en outre, que l'acier doux trempé est moins *fissil*, c'est-à-dire bien moins apte à la propagation des fentes que l'acier dur ou mi-dur sous l'action de chocs successifs.

La trempe à l'eau et au moyen de mélanges réfrigérants n'est pas possible pour durcir les blindages ; en certaines régions, d'une part, la vapeur qui se forme en plongeant l'énorme masse dans le liquide, empêche l'action réfrigérante de se produire et lorsque en d'autres régions la trempe se produit le danger des tapures devient trop grand par cette trempe *positive.* On a donc essayé pour les blindages la trempe à l'huile et la trempe au plomb en fusion : mais aucune de ces trempes ne pouvait convenir pour durcir suffisamment l'acier de manière à éviter la pénétration par les obus dits de *rupture.*

Le capitaine anglais *Tresider* voulut tremper la face des plaques *Compound* en lançant des jets d'eau froide sous une forte pression, évitant ainsi l'action de la vapeur : une pareille trempe donna de mauvais résultats à cause de la contraction de la face d'acier qui occasionnait sa séparation d'avec le sommier en fer.

Il fut démontré que les plaques de blindage en acier spécial (*nickel* ou *chrome nickel*) présentaient à la pénétration une très forte résistance, surtout lorsqu'elles avaient été l'objet d'une trempe énergique ;

pour que cette trempe pût produire tous ses effets l'acier spécial devait, en outre, être fortement carburé.

Un Ingénieur américain de l'aciérie de *Bethlehem*, M. *Harvey*, tourna la difficulté du traitement des aciers obtenus durs à la coulée en inventant un procédé de cémentation pour les plaques de blindage en acier *nickel*. Nous donnons de ce procédé la description qui en a été faite par M. *Moulin*, chef du service des aciéries de la Société *Cockerill*, à *Seraing*.

Il reste entendu que c'est à titre d'exemple, car il est aisé de concevoir combien les dispositifs de détail peuvent varier suivant les cas.

La plaque contenant de 0,30 à 0,35 0 0 de carbone est posée à plat dans un compartiment en briques réfractaires maçonné dans un four; elle est recouverte avec du charbon en poudre que l'on dame fortement par couches successives jusqu'à une épaisseur de 10 cent.; on ferme ensuite le compartiment par une maçonnerie réfractaire. Le four est alors porté à une température de 1200 à 1300° environ et progressivement : on estime qu'au bout de 120 heures la proportion de carbone du métal à la surface du blindage peut atteindre 1 0 0, cette teneur descendant à 0,10 0 0 à 0m. 75 de la surface. Un acier à 0,30 0 0 de C aurait donc, après cémentation, 1,30 0 0 de C à sa surface.

Après ce séjour de 120 heures de la plaque dans le four, on la retire sans enlever le charbon pour empêcher l'oxydation, puis on la laisse se refroidir. Quand la température s'est abaissée au rouge sombre, vers 700° environ, on lance des jets d'eau froide sous pression comme dans le procédé *Tresider*. L'action de la trempe est alors très énergique malgré la température relativement faible à laquelle elle est opérée, à cause de la grande carburation du métal.

Le procédé *Harvey* tend de plus en plus à se généraliser; néanmoins, les plaques d'acier au nickel et au chrome, durcies exclusivement par la trempe, tiennent encore dans la fabrication une place importante.

Dans le procédé *Demenge* employé, paraît-il, avec succès aux usines de *Pamiers*, l'acier fondu est coulé à 1400° dans un moule dont une des parois est constituée par une matière cémentante et dont la paroi opposée est refroidie afin d'empêcher la cémentation de se faire trop à cœur. Le résultat obtenu est variable selon la nature du cément, avec le charbon de bois la cémentation est beaucoup mieux assurée qu'avec le coke.

E. — *Notions complémentaires sur les plaques Harvey.* — Des expériences faites en 1889, en Amérique, sous la direction de M. B. *F. Tracy*, alors secrétaire de la « United States Navy », démontrèrent la supériorité de l'acier au nickel sur tout autre métal pour la fabrication des plaques de blindage.

C'est alors que le gouvernement des Etats-Unis et peu après ceux de France et d'Angleterre adoptèrent cet acier spécial pour blinder les navires.

En Amérique, c'est ordinairement au four Martin basique ou neutre qu'on élabore l'acier nickel ; on le coule dans d'immenses lingotières à section rectangulaire, on le pilonne, puis on le lamine en plaques d'environ 5 m. sur 2 m. 50 avec des épaisseurs variant de 15 à 45 cm.

On cémente ensuite ces plaques comme nous l'avons dit plus haut. Cependant quelques usines ont essayé de substituer au coke ou au charbon de bois, le plus ordinairement employés pour la supercarburation, des hydrocarbures tels que l'*acétylène*, *le gaz d'éclairage et les vapeurs de pétrole*.

La cémentation par le gaz d'éclairage a été employée, avec succès du reste, dans une de nos grandes usines.

Un perfectionnement important à signaler est celui de M. *William Corey*, de *Pittsburg*, consistant à soumettre la plaque de blindage après cémentation, et lorsqu'elle est encore à très haute température (1000° environ), à une compression uniforme très puissante. Ne serait-ce pas là une application intéressante du principe de la trempe par compression proposée par M. *Clémandot*, et que nous avons définie antérieurement ?

Après la carburation, il est certain que le métal s'est transformé moléculairement : nous savons, en effet, que la texture des aciers cémentés est fortement cristalline avant qu'on les ait soumis aux divers traitements ayant pour but d'en transformer le grain et de les rendre homogènes.

On prétend que, par le procédé *Corey*, la résistance des plaques est augmentée de 12 0/0 et la ductilité de leur métal de 15 0/0 environ.

Article 3. — Le revenu ou recuit après trempe.

Nous examinerons d'abord la pratique et le but du revenu, nous terminerons par quelques notions indispensables à connaître sur la trempe et le revenu des outils.

I. — *Pratique et but du revenu.*

Le recuit après trempe se fait *à une température relativement basse* et variable selon le but qu'on veut atteindre. Depuis quelques années on substitue à l'expression « *recuit après trempe* » un mot nouveau « *le revenu* »,afin d'éviter toute confusion avec l'opération calorifique spéciale du recuit qu'on exécute après le forgeage. Malgré son analogie apparente avec cette opération calorifique, le revenu a un but et des effets tout différents dont il sera ultérieurement question.

« *Le revenu consiste à chauffer également en tous ses points le métal* « *trempé, à une température plus basse que celle qu'il a subie pour la* « *trempe, vers 600° environ pour les pièces de forge ordinaires, mais* « *à des températures très variables pour certains objets tels que les* « *outils et les ressorts notamment.* »

Lorsqu'il s'agit de grosses pièces ce chauffage est généralement fait dans les fours qui ont servi à la trempe, mais dont on pousse moins activement les foyers. On prend les mêmes précautions pour que le chauffage soit bien régulier, puis on les laisse se refroidir lentement dans le four même dont toutes les issues sont fermées.

Le revenu diminue la dureté, la résistance à la rupture et la limite élastique d'un métal trempé ; cette diminution est d'autant plus importante que la température du revenu se rapproche plus de celle de la trempe ; l'allongement est augmenté et la *fragilité diminue.*

Par *fragilité*, il faut entendre, d'après la *Commission des méthodes d'essai*, la propriété que possède l'acier d'avoir une limite élastique assez rapprochée de la résistance de rupture et de subir dans cet intervalle, sous des efforts appropriés, des déformations permanentes assez faibles pour que la rupture s'ensuive.

Or, dans un acier trempé positivement, E, $\frac{E}{R}$ et R ont augmenté, A % ayant beaucoup diminué : en faisant revenir légèrement l'acier trempé on a pour but de corriger dans une certaine mesure l'exagération qu'a donnée à certaines propriétés le traitement si énergique de la trempe et, en tous les cas, de placer le métal à peu près en tous les points dans les mêmes conditions physiques.

Il y a toujours en effet, dans toute pièce trempée, des points qui auront été plus chauffés que d'autres, les parties minces étant aussi

plus chaudes que les parties épaisses. Il en résulte que, dans l'opération de la trempe proprement dite, les points plus chauffés tremperont plus énergiquement, de sorte qu'il y aura des tensions moléculaires inégales tendant à rendre les pièces, sinon moins résistantes à l'essai de traction, du moins plus sensibles à l'action des chocs, c'est-à-dire plus fragiles.

On s'aperçoit du reste de ces inégalités par le cintrement que prennent souvent les pièces de grande longueur après la trempe.

Souvent même quand cette courbure est prononcée, il faut redresser ces pièces ; pour cela, on les chauffe à très basse température et on les redresse en frappant avec précaution à coups de pilon ou à l'aide d'une presse à gabarier.

Après le redressement on *recommence souvent le revenu* pour éviter qu'au tournage, quand on enlèvera la croûte extérieure de la pièce brute de forge, celle-ci ne se cintre à nouveau.

II. — Trempe et revenu des outils et petites pièces.

Les aciers pour outils sont livrés par les aciéries en barres laminées ou mieux martelées avec des instruments de forgeage rapide (martinets, forgeuses, etc...). Ces barres de $1^{m}50$ à $2^{m}50$ de longueur ont des profils appropriés, ainsi celles pour *burins* et *bédanes* sont livrées avec les petits côtés arrondis.

Pour le service d'outillage des ateliers de construction, on emploie généralement trois sortes d'aciers :

1° L'acier naturel de *Styrie* et de *Carinthie*.

2° L'acier ordinaire ou de cémentation corroyé ou martelé, obtenu avec des fers de *Suède*, de *Russie*, de *Sheffield* et de l'*Ariège*.

3° L'acier fondu en petits lingots obtenu au creuset, depuis le plus ordinaire jusqu'au plus fin.

Quant aux aciers *Bessemer* ou *Martin* l'expérience a appris qu'ils pouvaient donner d'excellents outils ; mais il est acquis que les aciers qui les constituent résistent moins à l'usage, supportent moins bien les forgeages, trempes, et les revenus successifs qu'on est obligé de leur faire subir au fur et à mesure de leur emploi, etc... Quelques métallurgistes estiment qu'il faut attribuer cette infériorité à l'existence de l'oxyde de fer interposé en traces très faibles dans un métal obtenu

toujours à une allure plus ou moins oxydante et que les réactifs ne parviennent pas à éliminer d'une façon absolue.

Les petites pièces de machines, les outils travaillant sur toute leur périphérie, etc... se trempent en entier : dans aucun cas, pour une bonne trempe il ne faut jeter la pièce dans le baquet à tremper, à moins qu'elle ne soit très petite. Si la pièce reste immobile pour se refroidir, il est clair que la couche de liquide qui l'enveloppe s'échauffe et n'a plus la même action. Dans les grosses pièces, il se forme une couche d'air chaud ou de vapeur qui nuit au refroidissement. Il faut donc promener la pièce dans le bain de trempe.

L'eau est employée pour les ressorts de voiture, les ressorts de fil d'acier, les petits outils.

L'eau savonneuse ou au lait de chaux est employée pour tremper certaines pièces de taillanderie et de coutellerie; la pièce en entrant dans l'eau se recouvre d'une légère couche de savon ou de chaux, ce qui empêche la saisie trop prompte d'un acier mince ou sujet à taper.

L'eau salée et légèrement additionnée de sel ammoniac est employée pour les limes et râpes. Avant de les chauffer pour la trempe on enduit les limes d'un enduit destiné à protéger les dents contre les coups de feu, cet enduit est une pâte faite avec un peu de farine salée.

La lime ne subit pas de revenu, la soie est seule soumise à cette opération par immersion dans un bain de plomb fondu.

Pour le chauffage avant trempe on a de plus en plus recours au chauffage dans un bain de plomb fondu.

Le plomb est employé pour tremper les forets de bijoutier et d'armurier; après les avoir chauffés au rouge cerise peu avancé, on les enfonce dans un lingot de plomb qui fond au contact. Les forets ne sont pas revenus après cette trempe.

L'huile ou le plomb fondu, etc... peuvent être employés pour les scies, ressorts, ciseaux, etc...

Pour protéger le tranchant de certains outils on enduit souvent leur extrémité d'un peu de résine avant de les tremper.

Les aciers naturels de Styrie, communément appelés *aciers sauvages*, prennent la trempe au rouge peu avancé; ils doivent être chauffés au charbon de bois, car le soufre du combustible minéral leur est fort nuisible à la trempe. On obtient avec cet acier de très grandes duretés nécessaires pour les outils de graveurs; les forets en acier naturel sont très utiles pour percer les aciers durs.

Les outils difficiles à chauffer régulièrement au contact du combustible (*tarauds par exemple*, *limes*, etc.) sont chauffés dans un tube en terre réfractaire avec du coke tout autour ; on peut ainsi en chauffer plusieurs à la fois et les surveiller pour éviter qu'ils ne se brûlent.

On peut même, pour durcir certains aciers au cas où ils seraient trop doux, emplir le tube de poussier de charbon.

Les pièces de forge ordinaires, ou petites pièces de machines, etc., sont ordinairement revenues au rouge sombre plus ou moins avancé.

Pour les petites pièces auxquelles on veut laisser une grande dureté (*outils*, *pièces d'armes*, etc...) et qui sont assez petites pour qu'on puisse les nettoyer et les polir après trempe, on juge le revenu fait à une température assez basse, par la couleur que conserve la pièce après cette opération.

Le chauffage donne en effet une irisation de la surface due à la présence de lames minces d'oxyde de fer produites par ce chauffage même. La couleur de la lame mince varie avec son épaisseur et par conséquent avec la température qu'a prise le métal. Le phénomène est assez constant pour qu'on ait pu en déduire une sorte de mesure de l'intensité du revenu.

Les couleurs qui se produisent et les températures de revenu correspondantes sont énoncées dans le tableau ci-après :

Jaune paille clair	221°
Jaune paille foncé	232°
Ambre	243°
Gorge de pigeon	254°
Lilas	265°
Violet foncé	277°
Bleu indigo	280°
Bleu ordinaire	293°
Bleu pâle	317°
Vert d'eau	352°
Gris noir	400°

Un grand nombre d'outils n'ont pas besoin d'être entièrement trempés : dans un burin, un ciseau, etc... seul le tranchant doit être trempé.

Dans ce cas voici comment on opère :

Pour la trempe partielle d'un outil on trempe seulement la partie à

utiliser et on profite de la chaleur de l'autre partie pour recuire celle qui a été trempée. Pour bien juger des couleurs du revenu, il faut blanchir sur un grès la partie trempée.

Nous donnerons comme exemple la trempe et le revenu d'*un burin*.

Le burin est trempé à un centimètre du tranchant bien parallèle au niveau de l'eau.

On frotte ensuite ce burin avec un corps dur, du grès par exemple, on

Fig. 101. — Ouvrier faisant revenir un burin.

sur les battitures de l'enclume et on attend que la chaleur de la partie non trempée lui donne la couleur caractéristique du revenu.

Pour le burin c'est le bleu ; à ce moment on replonge l'outil dans l'eau pour empêcher le revenu d'augmenter d'intensité.

Il y a lieu de remarquer que cette seconde immersion ne donne pas de trempe, car la température de l'outil n'est plus assez élevée pour la réaliser.

On exécute quelquefois ce qu'on appelle un *revenu ou recuit à l'huile*

pour les lames de scies, les ressorts, les petites pièces et surtout les taillants fins. On enduit la pièce d'huile qu'on allume, ce qui donne la température pour obtenir le recuit demandé.

Pour obtenir un recuit régulier dans une pièce d'une certaine longueur (*tarauds*, par exemple) on la nettoie et on la polit après la trempe, puis on la place dans du sable ou grès contenu dans une boîte en tôle soumise à la chaleur d'un réchaud. Le grès se chauffe alors régulièrement et donne une nuance uniforme à la pièce à faire revenir.

On la sort de la boîte quand elle a obtenu sa couleur et on la nettoie avec une brosse; puis, avec une autre brosse fine imbibée d'huile, on la frotte légèrement pour la mettre à l'abri de l'oxydation. Les tarauds, en particulier, doivent être revenus à la couleur ambre.

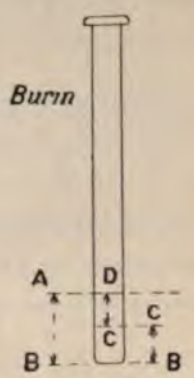


Fig. 192. — Burin.

CB, partie plongée dans le bain de trempe. — *AB*, partie chauffée au rouge cerise clair. — *DC*, partie dont la chaleur se répand dans la partie *CB* pour la faire revenir, dès qu'on l'a sortie du bain de trempe.

Certaines pièces ayant subi une trempe complète sont blanchies comme il a été dit, puis on les fait revenir sur une barre de fer chauffée au rouge.

Quand elles sont très petites, au lieu de les faire revenir sur une barre de fer chauffée, on les serre avec de petites tenailles préalablement chauffées.

D'autres pièces, telles que les ressorts de voiture par exemple, sont *revenues* au bois fumant, glissant, etc... on les sort du four qui les recuit et on juge de la température du revenu en les frottant avec un morceau de bois dur. Selon que le bois glissera, noircira, fumera, etc., on fixera le revenu en les plongeant dans l'eau.

En terminant ces considérations d'ordre pratique, nous dirons quelques mots de la trempe des fils d'acier à grande résistance et des cordes de piano, fabrication dont *Sheffield* a eu longtemps le monopole et que M. *Evrard* a introduite en *France*.

Après un étirage très prolongé à la filière et recuits appropriés dont on a parlé plus haut, le fil passe sur des bobines qui lui font traverser d'abord un bain de *plomb fondu porté au rouge* où il s'échauffe à une température parfaitement déterminée, puis un tube où il est arrosé avec de l'eau ou de l'huile, suivant le degré de trempe qu'on veut avoir.

Pour opérer le recuit après trempe, on peut ensuite le faire passer dans un autre tube chauffé où il se recuit.

Ce sont ces fils à très grande résistance qui rendent de grands services pour la fabrication des câbles et qui ont été utilisés pour le frettage des canons en entourant le tube d'un épais faisceau.

DEUXIÈME PARTIE. — THÉORIE DU TRAVAIL

Les théories explicatives du travail de l'acier résultent principalement des travaux de *Tchernoff*, de ceux de MM. *Osmond* et *Werth* exécutés en collaboration et de ceux de M. *Osmond*.

CHAPITRE I.

TRAVAUX DE TCHERNOFF

L'étude raisonnée du travail des métaux dérivés du fer a commencé dès qu'on a pu produire l'acier en grande masse, soit dès l'apparition des procédés *Bessemer* et *Martin-Siemens*.

Historique. — C'est à *Tchernoff*, directeur conseil de l'usine d'*Abouchow*, dont nous avons déjà analysé le mémoire remarquable concernant le lingot, que l'on doit la première solution nette et précise du problème consistant à transformer mécaniquement d'une façon rationnelle les pièces de fer ou d'acier.

L'étude de *Tchernoff* parut en avril et mai 1868 dans le bulletin de la *Société technique Russe*, fut traduite en anglais, en juin-juillet 1876, par M. *Anderson* et publiée par l'*Engineering*. En 1877, le capitaine d'artillerie de la marine *Viel* en fit paraître une traduction dans le *Mémorial de l'Artillerie de marine*; la même année, le bulletin de la *Société de l'industrie minérale* la donnait *in extenso*.

Cette étude était intitulée : « *De la structure de l'acier. — Observations sur son industrie et sur son mode de fabrication.* »

Plusieurs années s'écoulèrent avant que les principales usines fran-

çaises eussent songé à adopter les principes hardiment posés par ce savant métallurgiste ; mais, à la longue, ces principes finirent par s'imposer et aujourd'hui ils constituent comme la base des règles d'ordre général à suivre pour le travail des métaux dérivés du fer.

Un second mémoire de *Tchernoff* parut en 1878 et fut publié en France vers 1880 dans le bulletin de la *Société de l'industrie minérale* complétant, sur beaucoup de points, celui qui avait paru dix ans auparavant.

Néanmoins, ces mémoires ne rendent pas compte de toutes les difficultés du problème, et s'ils donnent les lois générales du travail de transformation du métal à chaud, ils passent sous silence le pourquoi de ces lois ainsi que les règles et l'explication d'un traitement métallurgique primordial, la *trempe*.

Article 1er. — Diagramme de Tchernoff

Tchernoff compare l'acier liquide à une solution saturée de sels cristallisables et définit comme il suit les diverses périodes de la cristallisation :

Soit un lingot d'acier refroidi après démoulage ; portons-le au rouge vif (*c'est-à-dire à une température correspondant pratiquement au rouge cerise plus ou moins clair et que nous définirons plus loin avec Tchernoff*), puis laissons-le se refroidir sans lui faire subir aucun travail mécanique.

On pourra constater alors un changement de structure correspondant aux diverses phases du refroidissement et variable, du reste, avec la nature de l'acier.

Cela posé, voyons comment *Tchernoff* établit son diagramme.

Le point O représentant le zéro de l'échelle thermométrique, les points *a*, *b*, *c* sont trois températures définies comme il suit :

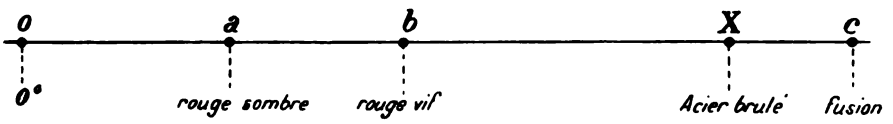


Fig. 193.

1° *Le point c* correspond à la température de *fusion* de l'acier et est

d'autant plus éloigné de O que le métal est moins carburé, plus doux, plus voisin du fer pur.

2° *Au-dessous de la température a*, l'acier, si dur qu'il puisse être, *ne se trempera pas*, quelle que soit la vitesse du refroidissement ; au contraire, il deviendra plus doux et sera plus facile à travailler à la lime.

3° *Au-dessus du point b*, l'acier passe de l'état cristallin (*correspondant au lingot coulé*) à l'état *amorphe* et conserve ce dernier état jusqu'au point de fusion *c*.

Si l'on chauffe l'acier de O à *b*, on n'observe aucun changement de structure : mais au-dessus de *b*, l'acier devient amorphe, et inversement il y a cristallisation quand la température tombe de *c* à *b*, et plus cet abaissement de température sera lent, plus les cristaux seront développés.

D'après *Tchernoff* ce même point *b* correspondrait à celui où le carbone est absorbé dans la cémentation ; il faut, par conséquent, pour cette dernière opération, chauffer au moins jusqu'à *b*.

4° *Enfin le point* X, correspondrait à une température voisine et inférieure au point de fusion, où, par le chauffage, l'acier se désagrège plus ou moins, suivant sa dureté ou sa douceur ; ce serait le point où l'on arrive à *l'acier brûlé*, s'écrasant sous le marteau.

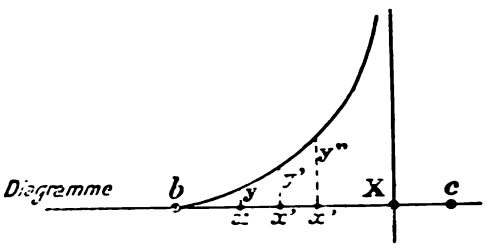


Fig. 194. — Courbe figurative de la grosseur des grains.

Le pouvoir qu'a l'acier de devenir *granulaire* peut se représenter graphiquement par une courbe dont les ordonnées y, y', y'',... figureraient le développement des grains aux températures correspondantes x, x' x'',... mesurées sur l'axe des abscisses, en opérant dans des conditions de refroidissement identiques depuis *b* jusqu'aux diverses températures x, x', x'',... La courbe devient ensuite asymptote (1) à la verticale passant par le point X, ce qui pratiquement veut dire que le grain acquiert à cette température sa grosseur maxima ; à ce point déjà

(1) Quelques auteurs ont placé l'asymptote au point *c* ; c'est absolument contraire au texte original de *Tchernoff*, et, du reste, on conçoit peu ce qu'il faudrait entendre par la notion objective du grain maximum à la température de la fusion.

défini l'acier ne peut supporter une forte chaleur de soudure mais tombe en pièce dans le feu. Plus l'acier est dur, plus basse est la tem-

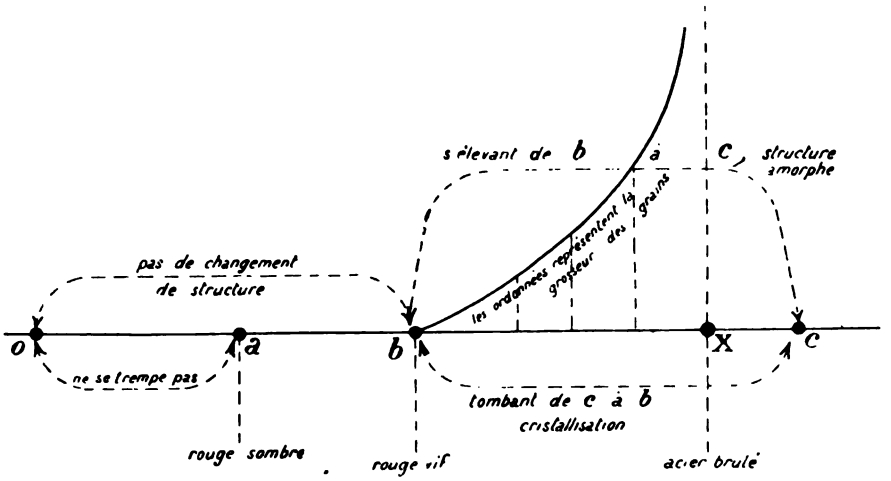


Fig. 195.

pérature à laquelle ce fait se produit, plus alors la température X se trouve près de O et loin de *c*.

Article 2. — La théorie du forgeage.

Quand on fabrique des objets en acier, dit *Tchernoff*, on cherche à les obtenir autant que possible d'une structure à grains fins ; de nombreuses expériences ont fait voir que plus la formation cristalline est prépondérante, plus gros et plus réguliers sont les cristaux d'acier, moindre est la résistance qu'ils offrent à la rupture, moindre est leur ténacité : de là, l'appréciation de la qualité d'après l'aspect de la cassure.

Si la cassure est à *grains fins*, on dit que l'acier est bien forgé et bien compact ; si la cassure est à *gros grains*, l'acier est mal forgé et *sans corps*, c'est-à-dire cassant sous un très faible choc et sans résistance.

I. — Forgeage au-dessus de b.

Dans le forgeage au-dessus de b, on change simplement la forme du lingot d'acier soumis au travail ; cependant, suivant la force relative

des coups et l'épaisseur du métal traité, on conçoit qu'on puisse, par un martelage conduit rapidement, empêcher dans une certaine mesure la cristallisation de la masse en conservant à l'acier l'état amorphe.

Il faudra, toutefois, pour pouvoir conserver en fin de traitement cet état amorphe dans le métal, que non seulement on ait pu l'empêcher de se refroidir et de cristalliser tranquillement, mais que le forgeage puissant et rapide *se soit terminé au-dessous du point b.*

Cela étant fait, si on laisse la masse se refroidir tranquillement, elle ne cristallisera plus et possédera ainsi une grande homogénéité de structure et par suite une grande ténacité.

Pour les gros lingots, le forgeage ne peut commencer qu'au-dessus de *b*, car au-dessous le métal ne serait pas assez déformable ; or, les régions axiales, à moins d'un chauffage excessif, dangereux pour le métal, auront pu ne pas atteindre cette température. Aussi, quoique le forgeage ait été commencé au-dessus de *b* et fini au-dessous de ce point pour les régions périphériques, il y aura nécessité, à cause des effets non comparables résultant forcément d'un travail exécuté sur un métal inégalement chauffé, de donner à ce dernier par un traitement spécial la texture *régulière et uniforme* à grains fins qui lui manque.

On y arrivera par la trempe de la pièce brute de forge, réchauffée *au-dessus de b* aussi régulièrement que possible dans toute son épaisseur ; et ce résultat sera d'autant mieux atteint que, par le corroyage préalable, la section primitive aura été plus fortement réduite.

Le forgeage effectué au-dessus de *b* ne donne au métal aucun accroissement de densité, «*la force des coups du marteau est trop petite « pour vaincre l'énorme force moléculaire qui maintient les particules « d'acier à une distance définie les unes des autres* ».

II. — *Forgeage au-dessous de b.*

Le *forgeage au-dessous de b*, au contraire, augmente la densité de l'acier qui peut atteindre 8, chiffre que n'atteint jamais l'acier forgé au-dessus de *b*.

Tchernoff l'explique de la manière suivante :

L'examen d'un acier au microscope montre des interstices considérables entre les groupes de grains et un examen plus minutieux permet d'observer des espaces entre les grains eux-mêmes.

Quand on chauffe au-dessus de *b*, il arrive un moment où l'état

amorphe est acquis lorsque les *atomes* (?), par suite de la dilatation, remplissent les interstices laissés entre chaque grain : ces interstices étant remplis, le martelage au-dessus de *b* ne peut donc augmenter la densité.

Au contraire, au-dessous de *b*, la dilatation n'est pas assez grande pour produire ce remplissage des interstices : un martelage peut dès lors resserrer le métal, c'est-à-dire augmenter sa densité.

En pratique, on ne forge jamais au-dessous de *b* ; il faudrait des marteaux trop puissants et ce martelage ne peut être appliqué qu'aux petites pièces. Le métal ainsi traité conserve son état cristallin s'il l'avait avant, les cristaux se déplacent et s'allongent, la densité augmente, la surface est nette, il ne peut dans certains cas être attaqué à la lime.

Tchernoff déclare n'avoir point suffisamment étudié l'augmentation de résistance à la traction d'un métal ainsi forgé, mais il est clair qu'on produit de cette manière un certain écrouissage, sorte de diminutif de l'écrouissage obtenu par le laminage à chaud des tôles minces, par le travail à froid de tréfilage, etc.

En résumé, le meilleur forgeage consisterait à marteler avec des engins suffisamment puissants en dessous de b, *à défaut de ces engins il faudrait forger au-dessus de* b, *mais terminer le forgeage au-dessous de ce point.*

Remarque. — *Tchernoff* ne donne au sujet de la trempe aucune explication personnelle et renvoie à cet effet à un travail de *Jullien* paru en 1866 à *Paris* : « *Les affinités capillaires et les phénomènes de la trempe mis en présence.* »

Il est sans intérêt d'analyser ici ce mémoire dont certains points spéciaux seront développés dans une théorie plus complète.

CHAPITRE II.

Théorie cellulaire des propriétés de l'acier

Cette théorie, due à MM. *Osmond* et *Werth* (1), Ingénieurs des arts

(1) M. Werth, aujourd'hui directeur d'une grande usine métallurgique, est aussi l'auteur d'un très grand nombre de perfectionnements importants dans les méthodes d'élaboration des aciers et, notamment, des aciers au nickel.

et manufactures, est la conséquence de travaux accomplis, pour la plus grande partie, au laboratoire des usines du *Creusot;* elle a été publiée par les Annales des mines en 1885.

La théorie cellulaire des propriétés de l'acier donne une explication fort simple et assez satisfaisante des effets des diverses opérations métallurgiques et de la cause de ces effets ; elle explique *dans une certaine mesure* l'influence des substances étrangères sur les propriétés des aciers. Nous verrons plus tard comment elle a dû être complétée pour expliquer des faits nouveaux ; quoique forcément plus complexe aujourd'hui que lors de son apparition, elle constitue néanmoins un corps de doctrine très remarquable, suscitant sans cesse de nouvelles expériences fort profitables aussi bien à la science pure qu'à l'industrie.

Aux critiques de parti pris des théories et aux défenseurs acharnés des procédés empiriques, nous opposerons les paroles si justes qui terminent le remarquable mémoire de MM. Osmond et Werth : « *Déjà, « dans le cadre que nous nous sommes tracé, nous avons dû laisser « bien des points obscurs et faire appel à plusieurs hypothèses que « l'avenir confirmera peut-être... ou infirmera comme tant d'autres.*

« *Mais, c'est le destin des théories de disparaître : leur excuse est « qu'elles provoquent de nouvelles expériences ; elles n'ont pas vécu « inutiles quand elles laissent après elles les faits qui ont servi à les « soutenir et à les attaquer, à les édifier et à les détruire.* »

Article 1er. — Structure cellulaire de l'acier.

Nous examinerons successivement les divers moyens d'investigation employés pour définir la structure cellulaire de l'acier.

Il sera expressément sous-entendu que nous entendrons par *acier*, sauf mention contraire, *le fer carburé* au sens industriel du mot, prenant ou non la trempe et obtenu par voie de fusion.

I. — Procédés d'investigation.

A. — *Examen microscopique des cassures.* — Cet examen va nous donner une première idée de ce qu'il faut entendre par le grain. Sous un même grossissement (*100 diamètres au moins*) on n'aperçoit plus

aucune différence entre les aciers durs ou doux, recuits simplement ou trempés.

Ce qu'on appelle *le grain* apparaît au microscope comme un amas de *granulations polyédriques* à peu près semblables.

Un acier dur, à grain fin à l'œil nu, prend ainsi examiné l'aspect d'un acier doux : un acier trempé, à cassure amorphe et presque vitreuse, prend sous un grossissement convenable l'aspect de la cassure du même acier recuit.

Ainsi, tous les aciers examinés au microscope semblent formés d'un seul et même polyèdre élémentaire dont les dimensions diamétrales moyennes sont au plus égales à 1/100 *de* mm.

Le grain n'est donc qu'un conglomérat de polyèdres élémentaires, le polyèdre élémentaire nous apparaissant comme la dernière unité figurée accessible aux instruments d'observation.

B. — *Méthode Weyl.* — Cette méthode définira la nature du polyèdre élémentaire.

1° — *Cas d'un acier non trempé.*— Quand on attaque un barreau d'acier par la méthode que *Weyl* a proposée pour le dosage du carbone, c'est-à-dire par HC*l* étendu au pôle + d'un élément de pile *Bunsen*, le résidu charbonneux garde la forme, l'aspect et les dimensions du barreau primitif. Delayé dans de l'eau ou mieux dans l'alcool pour éviter l'oxydation, ce résidu charbonneux est composé de paillettes très petites, grises, magnétiques : l'analyse démontre que c'est un carbure de fer.

La structure en paillettes de ce carbure indique qu'il est interposé dans l'acier, comme le graphite dans les fontes grises, entre les facettes des granulations polyédriques et non pas mélangé ou dissous uniformément.

Le barreau gardant sa forme après la dissolution du fer libre, il faut que le carbure constitue un réseau continu dans les mailles duquel le fer était logé.

Le polyèdre élémentaire est donc formé d'une granulation de fer doux généralement revêtue d'un enduit de carbure de fer d'épaisseur variable avec la dureté de l'acier.

On compare la granulation ferreuse du polyèdre élémentaire *au noyau* et le carbure à *l'enveloppe* des cellules organiques : on désignera par suite, par une assimilation un peu forcée, mais très commode, le polyèdre élémentaire sous le nom de *cellule simple*. Souvent aussi on emploie

le mot *ciment* pour désigner le carbure qui constitue l'ensemble des enveloppes cellulaires et cimente, pour ainsi dire, les noyaux entre eux.

2° — *Cas d'un acier trempé.* — Dans un acier trempé, surtout dans les régions périphériques, le résidu contient une bien moins grande proportion de paillettes : il se compose surtout d'une substance amorphe, gélatineuse, noirâtre, paraissant être un hydrate de carbone.

Il faut donc admettre que le carbone perd en grande partie par la trempe son rôle d'enveloppe et sa forme figurée pour se répandre plus uniformément dans la masse métallique.

C. — *Méthode des lames minces.* — On prépare des lames minces d'acier que l'on colle avec du baume de *Canada* sur une plaque de verre ; ces lames sont ensuite attaquées par l'acide azotique froid et étendu.

L'acide dissout le fer et transforme le carbure en un produit brun gélatineux encore mal connu mais qui représente, quelle que soit sa nature exacte, *la plus grande partie du carbone dans la position même que ce carbone occupait dans l'acier.* Le microscope fait voir que la distribution du carbone n'est nullement uniforme : la substance brune témoin nous révèle à nouveau le réseau cellulaire dont l'existence nous avait été indiquée déjà par des méthodes indirectes.

Indépendamment des cellules simples, les lames minces rendues transparentes montrent des lignes vides souvent assez larges *formant, dans les lingots bruts de coulée, un réseau polygonal fermé et à larges mailles;* c'est le réseau *des cellules composées* qui sera mieux défini par la méthode suivante. Ce réseau devient de plus en plus brisé, confus et incertain, à mesure que l'acier a été plus parfaitement modifié par le travail.

D. — *Méthode de l'attaque des sections polies par l'acide azotique.* — La méthode des lames minces est difficile ; mieux vaut se servir des sections polies que l'on attaquera avec l'acide azotique.

Cette méthode nous conduira à une notion nouvelle qui est celle de la *cellule composée.*

La méthode de l'attaque à l'acide des sections polies est fondée sur les mêmes réactions que la précédente : les lignes vides des coupes minces, représentant du fer doux, doivent se distinguer par leur éclat

métallique, tandis que les régions carburées prendront un aspect relativement terne.

Considérons tout d'abord *l'acier brut de coulée*, de cet examen découleront des conséquences fort importantes.

Les sections polies attaquées par l'acide azotique offrent, sur fond sombre, un réseau visible à l'œil nu de lignes blanches brillantes : les polygones ont une tendance très marquée à s'allonger normalement aux faces dans les régions périphériques, puis ils prennent des dimensions et des formes plus régulières; enfin, vers le centre, ils perdent toute leur netteté et s'enchevêtrent les uns dans les autres. On remarque dans l'intérieur des polygones un chevelu de traînées brillantes parallèles formant dans une même région un ou plusieurs systèmes arrêtés par le réseau polygonal : ce sont des coupes d'accroissements dendritiques indépendants qui se sont mutuellement limités par des surfaces grossièrement planes (1).

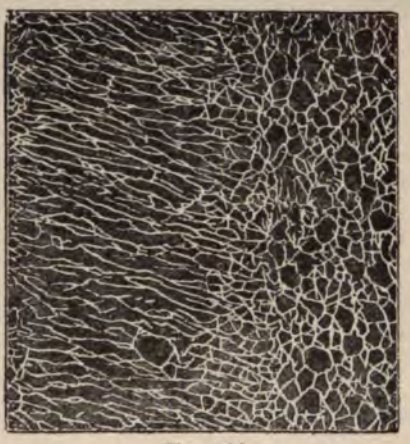


Fig. 196.

Or ces *surfaces de contact ne contenaient pas de carbure de fer*, puisque l'acide azotique les dissout sans résidu dans les lames minces et les accuse dans les attaques superficielles par des lignes métalliques; elles représentent des groupes de cellules simples dépourvues d'enveloppe et réduites à un noyau dont les facettes polygonales se distinguent nettement au microscope. Ces surfaces de contact sont aussi, au point de vue de la résistance aux efforts mécaniques, des surfaces de faiblesse : c'est suivant elles que se produisent les criques et les ruptures des lingots.

Ainsi, le réseau de moindre cohésion est aussi un réseau de carburation minima.

Ces conglomérats de cellules simples ont été appelés « *cellules com-*

(1) Remarquer la similitude des conclusions de MM. Osmond et Werth et de celles de Tchernoff relativement à la structure des lingots.

posées »; leur caractère le plus frappant est la rareté du carbure de fer dans leurs faces de contact.

Pour les distinguer des cellules simples on dit qu'elles n'ont *pas d'enveloppe :* cependant cette distinction serait par trop absolue, car, ce qui vraiment caractérise la cellule composée c'est qu'elle est un système dendritique unique; si elle contenait plusieurs systèmes d'axes, ce ne serait plus une unité simple.

En réalité, il y aurait lieu de distinguer deux espèces de cellules composées :

Les cellules composées de 1er ordre qui sont des conglomérats de cellules simples se composant en dendrites qui se limitent mutuellement.

Les cellules composées de 2e ordre qui sont des conglomérats de cellules composées de 1er ordre pouvant, dans des conditions déterminées, former des agglomérations complexes dépourvues d'enveloppe.

Les cellules composées de 2e ordre ont seules une grande importance car elles forment dans l'acier un *réseau doué de propriétés spéciales*, c'est d'elles seules qu'il sera exclusivement question dans la suite quand on parlera de *cellules composées ;* elles ne sont autre chose que le *grain de l'acier.*

E. — *Conclusions.* — Nous avons acquis la notion de la cellule simple et de la cellule composée. Voyons maintenant comment se modifie la texture selon le travail auquel un acier aura été soumis.

Dans l'acier forgé, les cellules composées seront beaucoup plus petites et plus uniformes que dans l'acier brut de coulée, leurs limites seront moins nettes et les cellules voisines présenteront de fréquentes liaisons.

Dans l'acier forgé et recuit, les cellules composées seront beaucoup plus petites et confuses.

Dans l'acier trempé on remarque au contact de l'acide azotique une coloration uniforme d'un noir intense qui montre bien la répartition continue du carbone à un état particulier, il semble que les cellules composées aient tout à fait disparu.

En résumé, d'après ce qui précède, on dira qu'un acier est homogène quand les cellules qui en forment le tissu ne seront soumises à aucun ordre géométrique et posséderont toutes leur enveloppe complète.

II. — *Genèse des cellules.*

Admettons pour l'instant que C ne soit pas combiné au fer dans l'acier porté aux hautes températures.

A. — *Genèse de la cellule simple.* — Considérons une masse d'acier fondu récemment coulée dans une lingotière, le refroidissement déterminera une recombinaison graduelle du fer et du C dissociés et, bientôt, la solidification du fer en excès moins fusible que les carbures.

Cette solidification du fer se fera en *globulites* qui se précipiteront au sein d'un liquide mère formé essentiellement de carbure de fer et contenant, en outre, diverses combinaisons du fer avec les métalloïdes. Ces globulites s'accrochent en partie aux parois déjà solidifiées, se rassemblant en partie au fond du vase clos que forment ces parois : là, de par leur poids ou de par la pression due au retrait, ils se serrent les uns contre les autres et, encore plastiques, se limitent par des faces de polyèdres.

A moins de pressions locales énergiques et ne se faisant pas équilibre, les granulations restent mouillées par leur *eau-mère* où domine le fer carburé mais qui comprendra aussi des phosphures de fer, siliciures de manganèse, etc... Cette eau-mère se solidifiera à son tour dans le joint des globulites polyédrisés les unissant en un seul bloc comme par *un ciment.*

Ajoutons, toutefois, qu'après la solidification complète, le carbone pourra ne pas s'être recombiné en totalité et qu'une partie pourra se trouver encore à l'état de liberté et rester telle, si l'on trempe, ou achever de se combiner pendant le refroidissement lent.

B. — *Genèse des cellules composées.* — Les globulites qui constituent le noyau de la cellule simple ne sont pas des unités indépendantes.

L'agrégation des globulites en édifices plus complexes est prouvée par les dentrites que montrent les attaques de sections polies et que *Tchernoff* signale au centre des lingots où le retrait du ciment les a laissés visibles et, pour ainsi dire, à sec.

Tout globulite précipité, ou bien est un centre d'organisation pour ceux qui se précipiteront après lui dans sa sphère d'action, ou bien se

réunit à une agglomération en voie de croissance, s'il en rencontre une assez rapprochée pour l'attirer.

Le centre d'agglomération a pu, à l'origine, ou se fixer aux parois antérieurement solidifiées, ou rester flottant dans un milieu encore liquide, mais trop froid pour le redissoudre.

De là deux modes de croissance :

Dans le 1er cas, soit *ab* la paroi de la lingotière, *pq* la limite de la portion solidifiée, α un centre d'organisation fixé : autour de ce centre d'organisation, l'agglomération correspondante tendra à se former suivant une demi-sphère de centre α. Les agglomérations voisines de centre β, γ... se développeront de la même manière; elles se limiteront donc réciproquement par une surface perpendiculaire à la paroi de la lingotière ou plus exactement à la surface de refroidissement. La structure du métal sera par suite formée de prismes ou d'aiguilles normales à la peau du lingot.

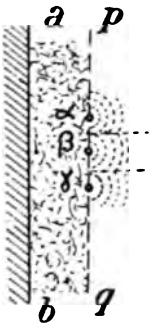


Fig. 197.

Dans le 2e cas, chaque agglomération pourra se développer dans tous les sens jusqu'à ce qu'elle arrive au contact des agglomérations voisines; elles tendront alors, sous l'effet de leur propre poids, à se limiter par des faces polyédriques.

Ainsi les agglomérations des globulites solides enduits de leur ciment encore liquide auront des formes prismatiques sur le pourtour des lingots et des formes polyédriques au centre.

Cela dit, on peut considérer deux périodes dans le refroidissement des lingots : l'une, pendant laquelle l'extérieur du lingot se refroidit plus vite que l'intérieur et par suite le comprime, l'autre pendant laquelle l'intérieur se refroidit plus vite que l'extérieur et se trouve soumis à des efforts de traction.

Or, dans la première période du refroidissement les prismes et polyèdres qui ne sont que des amas de globulites solides enduits de leur ciment encore liquide laisseront échapper facilement, sous l'action de la pression qui s'exercera sur eux, le ciment liquide qui les baigne. Ce ciment s'écoulera de l'extérieur vers l'intérieur du lingot par les plans de contact qui lui offrent des chemins tout tracés.

De là, la formation de la *cellule composée de 2e ordre*. Le ciment refoulé ainsi de l'extérieur vers l'intérieur remontera, vu sa faible densité, dans le haut du lingot.

Dans la partie centrale solidifiée sans pression, le ciment n'a pu être expulsé d'entre les polyèdres que par le poids relatif de ces derniers, aussi y a-t-il rarement à l'intérieur des lingots de vrais polyèdres à faces nettes; les cellules composées y ont une individualité assez mal définie.

III. — *Analyse immédiate de la cellule simple.*

Les différentes formes que peut affecter le carbone dans les fontes et les aciers ont de tout temps fait l'objet de nombreuses recherches de la part des ingénieurs métallurgistes. Nous ne saurions donner d'indication à cet égard sous peine d'aborder un sujet par trop spécial, nous nous bornerons à signaler des résultats à peu près acquis par l'expérience.

La méthode d'analyse des aciers par la méthode *Weyl* ayant permis à MM. *Osmond et Werth* l'analyse anatomique de la cellule en noyau et enveloppe, ces expérimentateurs furent amenés tout naturellement à étudier le résidu que cette méthode isolait et qu'ils avaient appelé le *ciment* de l'acier.

De leurs expériences il résulte que, dans les fers carburés, le carbone généralement appelé « *combiné* » forme deux variétés distinctes :

1° *Le carbone réellement combiné au fer ou carbone de recuit, ainsi nommé parce qu'il domine dans l'acier recuit où il constitue le ciment.*

2° *Le carbone de trempe, dissous probablement dans le fer, non combiné avec lui, dominant dans les régions périphériques des aciers trempés et disséminé dans les noyaux cellulaires.*

Examinons maintenant quel est le rôle joué, dans la répartition du carbone, par la présence des corps étrangers.

a) *Silicium.* — Nous avons dit antérieurement, à propos des fontes grises, que le silicium déplace le carbone de ses combinaisons avec le fer. *Si* paraît donc augmenter la proportion de C dissous : il agit donc d'une façon analogue à la trempe.

b) *Phosphore.* — Ce corps paraît se partager en proportions inégales entre les noyaux et les enveloppes. Dans les fontes et les aciers très carburés, Ph est presque entièrement dans les enveloppes. Dans les aciers extra-doux, il est surtout dans les noyaux.

c) *Soufre.* — Le soufre est tout entier dans l'enveloppe soit sous

forme de sulfure de manganèse, s'il y a du manganèse, soit sous forme de sulfure de fer, s'il n'y a pas de manganèse.

d) Manganèse. — Si ce corps est en grand excès par rapport au silicium et au soufre, ou si ces deux métalloïdes ne s'y trouvent pas, le manganèse est mélangé uniformément au fer dans les noyaux. En présence du silicium les choses se passent différemment.

Il est difficile, disent MM. *Osmond et Werth*, de localiser le siliciure de Mn. dans l'enveloppe de la cellule; la liquation de ce corps ne permet pas non plus de le supposer uniformément réparti dans le noyau; il forme probablement une combinaison indépendante conservant son identité comme un minéral cristallisé dans une roche.

En présence du soufre, le manganèse forme du sulfure de manganèse dans le ciment.

En l'absence de soufre et de silicium, le manganèse est uniformément réparti dans les lingots.

D'une manière générale, le carbone, le soufre et le phosphore se concentrent vers le haut des lingots, par suite de la liquation.

IV. — *Cause possible des changements d'état du carbone.*

Dans l'acier refroidi lentement à partir du rouge, il est établi par l'expérience que la plus grande partie du carbone est chimiquement combinée au fer. Il est, d'autre part, non moins établi que certains produits sidérurgiques renferment du carbone libre : fontes grises, etc...

Considérons donc comme très probable la dissociation normale du carbure de fer aux températures élevées.

Si le carbure de fer se dissocie à partir d'une certaine température (*ce phénomène paraissant commencer vers le bleu*) et qu'on refroidisse brusquement l'acier à partir d'une température supérieure, la trempe fera retrouver, tel quel, le carbone libre sous forme de carbone de trempe. Il est donc naturel qu'on ne trouve dans l'acier trempé par des méthodes différentes d'analyse que de faibles quantités de carbure de fer.

La façon dont se comporte ce carbone de trempe avec les divers réactifs conduit à le concevoir sous un état spécial : « *il faut supposer,* « *d'après MM. Osmond et Werth, une variété inédite de carbone de*

« *trempe et lui attribuer des affinités particulièrement puissantes.* » Une des caractéristiques de ce carbone de trempe serait sa mobilité.

On sait, en effet, que dans les aciers bruts de coulée, forgés ou recuits, le carbure de fer est extra-cellulaire ; au contraire, le carbone de trempe est intra-cellulaire, c'est-à-dire disséminé dans toute la masse métallique. Cette différence suppose donc, pour le carbone de trempe, une mobilité que démontraient déjà la cémentation du fer et d'autres phénomènes analogues. Et cette mobilité ne saurait être attribuée à la dissolution du carbure de fer dans le fer en excès, puisque le carbure de fer tend à disparaître de l'acier trempé.

Article 2. — Des changements d'état du fer

D'après ce qui précède il paraît vraisemblable d'admettre que le carbone joue un rôle important dans la trempe, puisque le fer doux trempé ne durcit pas notablement. Or, les modifications dues à la trempe peuvent être réalisées, bien qu'à un degré différent, par *l'écrouissage* et cela en l'absence d'aucune intervention du carbone. On est donc conduit à supposer que le carbone n'est pas forcément nécessaire à la manifestation des propriétés acquises par les aciers trempés.

De là découle l'examen d'une nouvelle théorie attribuant surtout à une transformation moléculaire du fer les effets de la trempe et de l'écrouissage.

1. — *Expériences fondamentales.*

L'étude calorimétrique des effets de la trempe et de l'écrouissage paraît être le moyen le plus sûr pour la démonstration de l'existence des états allotropiques différents du fer, car il est certain que les changements moléculaires des corps sont toujours accompagnés de modifications thermiques.

Pour cette étude calorimétrique, MM. *Osmond et Werth* ont mesuré les quantités de chaleur dégagées dans une même réaction par le même acier pris sous des états physiques différents. La réaction choisie est la *dissolution du fer dans le chlorure double de cuivre et d'ammonium*, le calorimètre employé étant le calorimètre à enceintes de M. *Berthelot* et le thermomètre celui de *M. Baudin* à échelle centésimale.

Le maximum de température était atteint au bout d'un temps variant de 5 à 10 minutes. Cette réaction se fait en deux temps; le cuivre est d'abord déplacé par le fer :

$$(1)\ Cu\,Cl^2 + Fe = Fe\,Cl^2 + Cu$$

et forme un précipité qui se dissout rapidement dans le chlorure cuivrique en excès :

$$(2)\ Cu\,Cl^2 + Cu = 2\,Cu\,Cl$$

On a donc finalement :

$$(3)\ 2\,Cu\,Cl^2 + Fe = 2\,Cu\,Cl + Fe\,Cl^2.$$

Le mémoire de MM. *Osmond et Werth* donne les tableaux fixant sur les valeurs numériques des diverses quantités de chaleur dégagées.

Partout, la trempe comme l'écrouissage s'accusent par une augmentation de chaleur croissant dans le même sens que la teneur en carbone.

MM. *Osmond et Werth pensent donc qu'on peut regarder comme établie l'existence de 2 variétés allotropiques du fer.*

Fer α dominant dans l'acier recuit.

Fer β mélangé au fer α dans les aciers trempés ou écrouis, en proportions variables selon l'intensité des causes qui l'y ont formé.

Nous verrons plus tard combien en réalité cette question est complexe et c'est d'un nombre supérieur de variétés allotropiques du fer qu'il faudra nous occuper.

II. — *Propriétés du fer α et du fer β.*

Passant sous silence les expériences nécessaires pour l'établissement des conclusions suivantes, nous retiendrons que lorsque le fer passe de la variété α à la variété β :

Il absorbe de la chaleur ;
Sa malléabilité diminue énormément;
Sa densité diminue;
Son coefficient de dilatation augmente ;
Ses constantes thermo-électriques diminuent;
Sa conductibilité électrique diminue;
Ses réactions chimiques deviennent plus énergiques.

Le fer passe plus ou moins complètement de la variété α à la variété β :

1° Par tout martelage ou toute pression produisant une déformation permanente à une température inférieure au rouge sombre.

2° Par le refroidissement rapide, à partir d'une température supérieure au rouge sombre, mais seulement en présence du carbone et de quelques autres corps (*manganèse, tungstène*) qui produisent, soit directement, soit par une action secondaire sur le carbone des effets analogues sur les propriétés de l'acier.

Réciproquement, le fer revient par le recuit de l'état β à l'état α, et cela d'autant plus complètement que la durée du recuit est plus longue et sa température plus élevée.

En résumé, MM. *Osmond et Werth* établissent leur théorie cellulaire sur quatre bases fondamentales :

1° *La formation des cellules simples ;*
2° *La formation des cellules composées ;*
3° *La dissociation du carbure de fer (ciment) ;*
4° *La transformation allotropique du fer.*

Article 3. — Le travail de l'acier et la théorie cellulaire

Nous expliquerons successivement à l'aide de la théorie cellulaire :

1° *Les effets du recuit ;*
2° *Les effets du forgeage ;*
3° *Les effets de la trempe et du revenu après trempe ;*
4° *Les effets de l'écrouissage.*

I. — *Les effets du recuit.*

Les points *o*, *a*, *b*, *c*, X dont il sera question sont ceux du diagramme de *Tchernoff*.

Cela dit, nous faisons subir au lingot des recuits de 0 à la température de fusion du métal.

Quand on chauffe de o à a, on atteint la température à laquelle le carbure de fer *commence* à se dissocier. La structure du métal ne sera

donc aucunement modifiée par un recuit effectué dans cette zone.

Quand on chauffe de a à b, température de fusion du ciment, la dissociation du fer et du carbone se produit, amenant la diffusion du carbone dans la masse et rendant les grains de plus en plus plastiques.

Par refroidissement, la texture de l'acier sera beaucoup plus homogène car les cellules composées auront été en partie détruites ; le ciment se sera formé dans les régions qui pourraient en manquer et sera plus uniformément réparti dans la masse. Comme la température n'est cependant pas assez forte pour que les mouvements moléculaires dus à la force cristallogénique puissent aisément s'accomplir, les granulations ferreuses seront très petites, régulières et entourées d'un simple vernis de ciment ; le métal sera à grains relativement fins. D'un autre côté, et précisément parce que la température *b* n'est pas très élevée, le recuit sera forcément un moyen incomplet d'améliorer à lui seul l'acier coulé.

En effet, la diffusion du carbone, véritable cémentation intérieure, est très lente à cette température ; il en résulte que la portion du ciment non dissociée reste en place, c'est-à-dire très inégalement répartie.

Quand on chauffe entre b et c, température de *fusion de l'acier*, le ciment qui subsiste dans les joints les plus gros va fondre. Si on laisse refroidir le lingot, on se trouve dans les conditions de la solidification des lingots décrite lors de l'étude du lingot d'acier (*Tchernoff*) ou dans cette étude même, à propos de la genèse des cellules. Les arrangements cristallins seront d'autant plus lents et plus difficiles que le point de départ du refroidissement sera plus voisin de *b*.

Fer brûlé et oxydé.

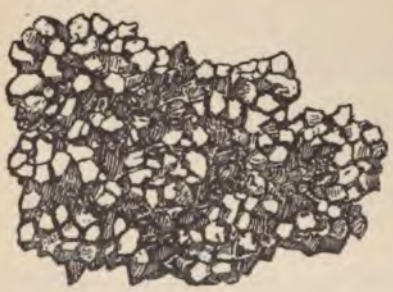


Fig. 198.

Si l'on maintient trop longtemps le métal à une température supérieure à *b*, ou si l'on chauffe trop près de *c*, le ciment pourra s'écouler sur la sole du four et laisser les granulations ferreuses sans cohésion, on aura alors ce qu'on appelle du *fer brûlé*.

Pour régénérer ce métal on pourra le soumettre à un nouveau recuit, mais cette régénération ne pourra pas être complète car une partie du carbure ayant été éliminée on n'aura plus affaire au même métal.

II. — *Effets du forgeage.*

Entre o et a, le forgeage est très difficile et produit *l'écrouissage* du métal, c'est-à-dire un changement de ses propriétés caractérisé par une augmentation de E, une diminution de A 0/0, etc... Par le forgeage à cette température, les cellules changent simplement de forme ; mais le ciment non plastique se fissure en tous sens. Il est naturel d'admettre qu'aucune transformation du carbone n'a pu s'effectuer, mais sous l'action du choc ou de la pression résultant du forgeage le fer s'est transformé moléculairement et de la forme α a dû passer à la forme β.

Entre a et b, le forgeage devient d'autant plus facile qu'on est plus près de *b* ; c'est un peu au-dessous de *b* qu'il faut forger car le ciment dont la dissociation se poursuit devient de plus en plus pâteux. Le martelage, en pétrissant le métal, achève mécaniquement la distribution du ciment commencée par le chauffage.

Au-dessus de b, le ciment est fluide, il peut s'écouler sous la pression et les chocs en laissant des surfaces de faiblesse identiques à celles de l'acier coulé. Le forgeage ne servira dans ce cas qu'à agiter la masse et à empêcher qu'aucun point puisse se refroidir en repos jusqu'à ce que la température soit descendue au-dessous de *b* (*au rouge cerise clair*). Dans ce cas, il faut, comme on sait, terminer cette opération au-dessous de *b*, pour que l'acier ne puisse perdre la texture qu'on lui a donnée à grand peine.

III. — *Effets de la trempe et du revenu après trempe.*

De o à a, la trempe ne produit aucun effet.

De a à b, le métal prend la trempe de plus en plus vivement ; par ce refroidissement brusque le carbone libre n'a pas le temps de se combiner au fer et reste à l'état de carbone de trempe ; le fer du noyau passe en partie à l'état β.

Si, au contraire, le refroidissement est lent, le carbone libre se combine de nouveau avec le fer, le noyau reste ou revient à l'état α.

Tel est le cas du recuit.

Nous verrons plus tard dans la théorie générale de la trempe com-

ment s'expliquent les trempes négatives et comment elles se relient aux trempes positives.

En pratique, comme le refroidissement n'est jamais ni infiniment lent, ni infiniment rapide, on conçoit que le carbone de recuit et le carbone de trempe, le fer α et le fer β coexistent généralement, bien qu'en proportions relatives très variables dans l'acier refroidi.

De b à c, le ciment est devenu rare à cause de la dissociation croissante des carbures. Par la trempe, la proportion de fer β est exagérée, les cellules composées ont le temps de se reformer, de sorte que le métal est très dur, mais n'a *plus de corps*.

Quant aux effets du *revenu après trempe*, soit du recuit à basse température, ils consistent à ramener en partie le fer β à l'état α et à faire repasser à l'état de carbone combiné le carbone de trempe ; mais il y a lieu de remarquer qu'à cause de la basse température la reconstitution du carbure a lieu *in situ*, c'est-à-dire que ce carbure est presque uniformément réparti dans le métal, dans un état de division extrême. Le grain restera donc très fin et la fragilité aura disparu, car c'est surtout au fer β qu'il faut l'attribuer. Il reste entendu qu'un revenu effectué à la température des recuits ordinaires détruirait complètement les effets de la trempe.

IV. — *Remarque sur la position des points b et c.*

Il est acquis que les points *b* et *c* ne sont pas fixes et varient, soit *avec la dureté*, soit avec *la pureté* des aciers.

1° — *Avec la dureté* parce que, dans les aciers durs, le ciment est plus carburé ou plus épais que dans les aciers doux, selon qu'il est formé d'un carbure unique défini ou d'un mélange variable de carbures. Dans le 1er cas, il fond à température plus basse : dans le 2e il a un point de fusion fixe mais la consistance de la masse sera d'autant moindre, à température égale, que la proportion de la partie fluide y sera plus grande, comme dans un mortier gâché plus clair. De toutes façons, les points *b* et *c* s'abaissent pratiquement quand la teneur en carbone augmente.

DIAGRAMME de TCHERNOFF

Quand la température ne s'élève pas au-dessus de *a*, l'acier ne prend pas la trempe.

Quand la température s'élève de 0 à *b*, la texture de l'acier est invariable.

Quand la température descend de *c* à *b*, la texture de l'acier devient cristalline

Quand la température s'élève de *b* à *c*, la texture de l'acier devient amorphe.

THÉORIE CELLULAIRE	0	a	b	c
ÉTAT DU CIMENT	Solide et rigide		Solide, puis pâteux	Liquide
ÉTAT DU NOYAU	Non modifié si l'on part d'un acier recuit ; si l'on part d'un acier trempé le chauffage détermine un nouvel état d'équilibre entre le fer α et le fer β.	Subit peut-être une transformation allotropique.	Devient de plus en plus plastique à mesure que la température s'élève.	Fond dans le ciment.
TRANSFORMATION de la structure par le refroidissement — lent	Nulle	Température du bleu	Le grain devient plus régulier ; les cellules composées tendent à disparaître	Les cellules composées se reconstituent.
TRANSFORMATION de la structure par le refroidissement — brusque	Nulle	Le carbure de fer commence à se dissocier.	Prend la trempe de plus en plus vive.	Métal brûlé. Le métal trempé n'a plus de corps.
TRAVAIL MÉCANIQUE	Difficile avec écrouissage et apparition de la schistosité.		Devient de plus en plus facile. (Zone normale de travail.)	Difficile, mais possible avec précautions. / Impossible.
SOUDURE	Impossible		Apparente	Zone de soudure. / soudure facile, mais on ne peut plus pratiquement régénérer le métal.

Fusion du ciment.

Fusion de l'acier.

2° — *Avec la pureté*, car à teneur en carbone égale, les proportions des impuretés qui s'amassent dans le ciment en font varier et, généralement, en abaissent le point de fusion.

Avec le soufre et le phosphore, surtout en présence de fortes proportions de carbone, l'épaisseur du ciment augmente en même temps que sa fusibilité ; il en résultera que la zone de travail sera diminuée d'autant et que les arrangements des globulites en cellules composées pourront commencer à plus basse température.

Le phosphore paraît aussi former avec le carbure de fer un composé complexe non dissociable : les aciers phosphoreux durcissent peu par la trempe.

Le manganèse, en se combinant au soufre, combat un peu les mauvais effets de ce métalloïde, il semble encore augmenter la solubilité du carbone libre dans le fer et activer ainsi la dissociation du carbure ; de là son action sur la trempe exactement contraire à celle du phosphore.

Dans les fers, la *scorie* de puddlage joue le même rôle physique que le ciment dans les aciers.

V. — *Effets de l'écrouissage.*

Les propriétés de l'acier à froid dépendent à la fois de la plasticité du noyau et de la résistance que l'enveloppe oppose à la déformation du noyau.

1° — *Plasticité du noyau.* — Il est fonction de la proportion relative de fer α et de fer β qui s'y trouvent mélangés, le fer β augmentant, comme on l'a vu, avec la teneur en carbone, et, pour une même teneur, avec l'énergie de la trempe et de l'écrouissage.

Les corps étrangers qui, comme le manganèse, augmentent à la fois la dureté, la force coercitive, la résistance électrique, etc... doivent contribuer à la formation du fer β, soit directement, soit en facilitant, toutes choses égales d'ailleurs, la dissociation du carbone d'avec le fer.

2° — *Résistance de l'enveloppe à la déformation.* — La déformation du noyau suppose celle de l'enveloppe. Or, l'enveloppe qui n'est autre chose qu'un composé de fer avec le carbone et d'autres métalloïdes, est rigide et peu extensible ; elle oppose donc aux mouvements de son contenu une certaine résistance dépendant à la fois de son épaisseur et de sa composition chimique.

Dans les déformations des métaux à froid, il y a donc lieu de considérer comment se comportent sous l'action de l'effort le ciment et le noyau.

Nous développerons plus loin, lors de l'étude des essais de traction, les explications données à cet égard par MM. *Osmond* et *Werth*.

CHAPITRE III

EXPOSÉ PLUS PRÉCIS DES TRANSFORMATIONS DU FER ET DU CARBONE CONDUISANT A LA THÉORIE DE LA TREMPE

Dans un mémoire paru en 1888 et intitulé « *Transformations du fer et du carbone dans les fers, les aciers et les fontes blanches* », M. *Osmond* contrôle et précise par de nouvelles expériences les conclusions auxquelles il était précédemment arrivé dans son étude sur *la théorie cellulaire des propriétés de l'acier*, exécutée en collaboration avec M. *Werth*.

Article 1er. — Expériences fondamentales

Nous résumerons d'abord les principales expériences relatées par M. *Osmond* au début de son remarquable mémoire.

I. — *Polymorphisme du fer.*

Dès 1869, M. *Gore* avait constaté qu'un fil de fer abandonné au refroidissement, à partir du rouge clair, ne fait pas un retrait régulier.

Un fil serré à l'une de ses extrémités par une vis de pression était relié par l'autre à un levier multiplicateur et tendu par un faible ressort. On n'observait rien d'anormal pendant le chauffage ; mais, au refroidissement, lorsque la température avait atteint le rouge un peu sombre, le retrait était brusquement interrompu par un allongement momentané. M. *Gore* attribua ce phénomène à une diminution dans la cohésion du métal.

En 1873, M. *Barrett* reprend l'expérience de M. *Gore* en amplifiant au moyen d'un miroir les mouvements de l'extrémité libre du fil. Il confirme le fait signalé lors du refroidissement, mais observe un phé-

nomène inverse ; c'est-à-dire un retrait passager se produisant pendant le chauffage, à peu près à la même température que l'allongement anormal pendant le refroidissement. Avec le fer dur et l'acier ces perturbations sont le plus marquées ; certains fers doux ne les donnent pas.

M. *Tait*, en 1873, constate les changements moléculaires du fer en construisant les diagrammes thermo-électriques de deux couples types formés de fer pur et d'acier respectivement associés à un alliage de platine : ces diagrammes présentent des points singuliers.

En étudiant la mesure des hautes températures par les couples thermo-électriques, M. H. *Le Chatelier*, en 1886, constate également deux changements de courbure dans la courbe des forces électro-motrices pour les couples qui comprennent le fer.

M. *Baur*, en 1880, étudie les variations du magnétisme temporaire du fer doux avec la température. Ses conclusions sont les suivantes :

Pour de petites forces magnétisantes, le magnétisme temporaire croît rapidement avec la température, atteint un maximum au rouge et tombe brusquement à zéro. Pour de grandes forces magnétisantes, le magnétisme temporaire croît lentement avec la température et s'abaisse brusquement au rouge à une très faible valeur.

Il y a lieu de signaler également les travaux de MM. *Smith*, *Knott* et *Macfarlane* sur la résistance électrique, ceux de M. *Pionchon* sur les chaleurs spécifiques et les changements d'état : tous ces travaux conduisent à la constatation de divers états allotropiques pour le fer suivant la température à laquelle ce métal est porté.

Nous décrirons plus loin les expériences fondamentales faites sur ce point par M. *Osmond*.

Il semble acquis à la suite de ces expériences que le fer, au lieu de se refroidir d'une façon régulière, présente, à la manière du soufre, deux dégagements anormaux de chaleur, le premier brusque et très net à 855° ; le second progressif est moins accentué entre 750° et 690°.

Le fer est donc *polymorphe*.

Ces dégagements de chaleur nous révèlent, soit deux changements moléculaires successifs, soit un seul changement discontinu ; en l'absence de preuves certaines permettant de décider entre ces deux hypothèses, adoptons provisoirement la suivante : le fer est à l'état β au-dessus de 855°, à l'état α au-dessous de 690° et constitue pendant la période intermédiaire un mélange des deux variétés allotropiques.

II. — *Récalescence. Changement d'état du carbone.*

En répétant ses premiers essais dans une chambre sombre *avec de l'acier*, M. *Barrett* découvre un second phénomène qui accompagne le premier. Il se produit vers le rouge sombre avec un refroidissement lent, un nouveau dégagement de chaleur. Ce phénomène a reçu de M. *Barrett* le nom de *récalescence*.

D'après les recherches de M. *Brinell* qui paraît avoir ignoré les expériences de M. *Barrett*, la récalescence ne se produit pas pour les fers et les aciers extra-doux, mais seulement pour les aciers d'une certaine dureté ; elle est donc *en relation avec la présence du carbone*.

D'autre part, si l'on chauffe au blanc une série d'éprouvettes d'un même acier et qu'on les trempe successivement dans l'eau froide à différentes périodes du refroidissement, on peut vérifier que le carbone est à l'état de *carbone de trempe* ou de *carbone de recuit* selon que le métal a été trempé avant ou après la récalescence. Ce dernier phénomène correspondrait donc au changement de forme du carbone, changement qui dégage de la chaleur lorsque le carbone passe de l'état de carbone de trempe à l'état de carbone de recuit.

La récalescence et le changement moléculaire du fer sont deux phénomènes absolument distincts par nature, mais ils peuvent réagir l'un sur l'autre. A mesure que la teneur en carbone s'élève, on voit les deux dégagements de chaleur qui se produisaient pendant le refroidissement du fer doux se réunir en un seul et s'abaisser progressivement jusqu'à venir coïncider avec la récalescence.

Le carbone maintient donc le fer à l'état β d'autant plus énergiquement qu'il est présent en proportion plus forte ; nous verrons plus tard que d'autres corps jouissent de la même propriété.

Article 2. — Travaux de M. Osmond

Nous ne pouvons donner qu'un résumé de ces importants travaux ; l'essentiel sera de retenir les principaux résultats.

I. — *Méthode expérimentale.*

M. *Osmond* a repris la méthode de M. *Barrett* en suivant la marche du refroidissement ou de l'échauffement sur des échantillons appropriés

Tout dégagement et toute absorption de chaleur résultant d'un changement physique ou d'une réaction chimique devront se traduire par un ralentissement ou une accélération anormale dans la marche régulière du thermomètre.

La mesure des températures a été effectuée à l'aide du couple thermo-électrique de M. H. *Le Chatelier* platine pur fondu et platine rhodié à 10 0/0 : les forces électro-motrices ont été mesurées à l'aide du galvanomètre apériodique à miroir de MM. *Deprez et d'Arsonval*. Nous passerons sous silence les diverses formules employées par M. *Osmond* pour transformer les indications de l'échelle en degrés centigrades.

Pour représenter graphiquement les expériences, deux systèmes différents ont été employés :

On peut prendre pour ordonnées les températures et pour abcisses les temps à partir du moment où l'on a commencé à les noter : ce système est le seul qui se prête à la représentation de la récalescence, mais il ne met pas en évidence les petites perturbations. Pour bien montrer ces dernières, on a pris les températures pour abscisses et pour ordonnées les temps compris entre les passages de l'index sur deux divisions successives de l'échelle.

II. — *Résultats d'expérience.*

Tout d'abord représentons par la lettre *a* toutes les perturbations qui se rattachent au phénomène de la trempe et par conséquent au point *a* que *Tchernoff* a défini en disant : « *quand la température ne s'élève pas au-dessus de a, l'acier ne prend pas la trempe.* »

L'expérience démontre qu'en réalité le point *a* n'est pas toujours simple : il peut exister divers points critiques voisins correspondant soit aux transformations du carbone, soit à celles du fer. On constate que le point *a* est triple pour les fers et les aciers extra-doux, double pour les aciers mi-durs, simple pour les aciers durs.

De plus, pour chacun de ces aciers, le dégagement de chaleur qui pendant le refroidissement correspond à l'un des points critiques n'est pas exactement à la même température que l'absorption de chaleur correspondant au même point critique pendant le chauffage.

M. *Osmond* a appelé :

a_{r1}, a_{r2}, a_{r3}, les points critiques du refroidissement.
a_{c1}, a_{c2}, a_{c3}, — chauffage.

Les points critiques sont d'autant plus nettement séparés que la teneur en carbone est plus faible : à mesure qu'on arrive aux aciers durs ils se rapprochent et finissent par se confondre (*voir au titre IV les courbes de refroid*[t]).

Les perturbations observées pendant le refroidissement lent ou le chauffage ne sont pas instantanées, elles s'étendent sur une certaine zone de température vers le milieu de laquelle on remarque généralement un maximum. C'est ce point maximum que pour simplifier nous désignerons dans le tableau qui suit.

Les symboles $a_{r_{1\,2}}$, $a_{c_{3\,2\,1}}$, etc... signifient que les températures a_{r_1}, a_{r_2}, ou bien a_{c_3}, a_{c_2}, a_{c_1}, se sont confondues.

Acier extra-doux . .	$a_{r_3} = 822°$ $a_{c_3} = 900°$	$a_{r_2} = 730°$ $a_{c_2} = 725°$	$a_{1} = 658°$ $a_{c_1} = 690°$
Acier mi dur . . .	»	$a_{r_{32}} = 695°$	$a_{r_1} = 661°$ $a_{c_{321}} = 705°$
Acier dur	»	»	$a_{r_{321}} = 674°$ $a_{c_{321}} = 705°$

Il paraît hors de doute que le point a_1 est dû à la transformation du carbone de trempe en carbone de recuit; reste à savoir si les deux points a_3 et a_2, distincts dans les métaux les moins carburés, correspondent à deux modifications moléculaires également distinctes ou à deux périodes d'une modification unique du fer. Il ne paraît pas encore possible de résoudre cette question à l'aide des expériences relatées dans le mémoire que nous analysons.

C'est pourquoi M. *Osmond*, ainsi que nous l'avons dit plus haut, n'admet, *provisoirement au moins et jusqu'à preuve du contraire*, que deux états allotropiques du fer, α et β, le passage de l'un à l'autre pouvant être brusque et total, ou bien progressif et discontinu selon la composition chimique du métal.

L'étude de l'influence de la vitesse du refroidissement sur la position des points critiques conduit à la théorie de la trempe.

III. — *Théorie allotropique de la trempe.*

A. — *Causes de la trempe.* — Les phénomènes chimiques et les transformations dimorphiques exigent toujours un certain temps pour s'accomplir, n'acquièrent une vitesse notable qu'à une certaine distance du point d'équilibre et ne sont généralement possibles que dans certaines limites de température.

Si donc on hâte le refroidissement de l'acier, les transformations qui se produisaient pendant le refroidissement lent ne s'accompliront plus intégralement.

Le soufre, par exemple, refroidi rapidement à partir d'une température convenable, prend l'état de soufre mou, et conserve, du moins pendant quelque temps à la température ordinaire, la forme qui est en équilibre stable au-dessus de 260°.

On appellera *acier trempé* un acier où le fer et le carbone auront conservé plus ou moins complètement à froid l'état qu'ils possédaient aux températures élevées ; la chaleur des transformations non effectuées restant disponible dans le métal. Cette chaleur a été désignée sous le nom de « *chaleur latente de trempe.* »

L'existence de cette chaleur latente de trempe est mise en évidence dans la méthode expérimentale décrite plus haut par l'arrêt relativement long de l'appareil de mesure des températures pendant les transformations ; elle est aussi démontrée par des essais calorimétriques, elle peut l'être par le dégagement de chaleur qui se produit pendant le réchauffage de l'acier trempé.

Pour qu'une portion notable du fer conserve l'état β dans l'acier doux, il faut une vitesse de refroidissement très rapide qu'on peut seulement obtenir avec des mélanges réfrigérants.

Si, au contraire, la teneur en carbone s'élève, comme le carbone donne de la stabilité au fer β et qu'il est facile, par une trempe moins énergique, de conserver du carbone de trempe, il est également facile de maintenir du fer à l'état β, à la faveur de ce carbone de trempe.

B. — *Est-ce à la présence du fer β ou à celle du carbone de trempe qu'il faut attribuer les propriétés caractéristiques des aciers trempés?* Nous abordons ici une des questions les plus controversées de la sidé-

rurgie moderne; nous ne saurions donner par suite de solution définitive à ce problème. Il nous suffira d'exposer par ordre les motifs allégués en faveur de telle ou telle théorie, et cela en temps opportun.

Pour le moment, acceptons les conclusions de M. *Osmond*.

M. *Osmond* recherche quelle part est attribuable au fer et quelle part au carbone dans les propriétés nouvelles que la trempe communique à l'acier. Il choisit pour cela l'acier mi-dur où, pendant le refroidissement lent, la perturbation a_{r32} due à la modification du fer se distingue encore nettement de la perturbation a_{r1} produite par la combinaison du carbone.

Trois barreaux de la nuance d'acier indiquée sont choisis et chauffés à une température suffisante pour que tous les phénomènes inverses de ceux que nous avons étudiés soient accomplis; trempons-les successivement comme il est dit ci-après :

1°) Avant a_{r32}, c'est-à-dire avant le commencement de la modification du fer.

2°) Après le maximum de a_{r32} et avant le début de a_{r1}, c'est-à-dire dans la période où, la transformation du fer étant très avancée, celle du carbone n'est pas encore commencée.

3°) Immédiatement après a_{r1}, c'est-à-dire quand toutes les transformations sont effectuées.

On essaye les barreaux ainsi préparés à la lime pour juger de leur dureté et, à la touche par l'acide azotique, pour vérifier l'état du carbone.

On trouve que :

1° La trempe avant a_{r32} fournit l'acier trempé normal, dur à la lime, avec son carbone à l'état de carbone de trempe.

2°) Après la 2e trempe, entre a_{r32} et a_{r1} le carbone est encore à l'état de carbone de trempe, mais le métal est doux à la lime.

3°) Lorsque la trempe n'a été faite qu'après a_1, le métal est doux à plus forte raison, et le carbone est à l'état de carbone de recuit.

M. *Osmond* conclut (1) :

« *C'est donc essentiellement la persistance du fer β qui donne à l'acier* « *trempé ses propriétés caractéristiques.* »

Pour résumer ce qui précède appelons t_1, t_2, t_3 les températures aux-

(1) Nous n'admettons cette conclusion que temporairement; nous en discuterons ultérieurement la valeur à l'étude des *Théories finales*.

quelles sont descendus les 3 barreaux au moment où on les trempe; le diagramme et le tableau suivants fixeront les résultats :

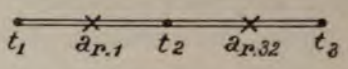


Fig. 199.

1er barreau. .	temp^{re} t_3	fer β, carbone de trempe	dur à la lime
2e barreau. .	temp^{re} t_2	fer α, id.	doux id.
3e barreau. .	temp^{re} t_1	fer α, carbure de fer.	doux id.

Quant à l'influence du carbone, elle est indirecte et de même nature que celle de la vitesse du refroidissement. La vitesse de refroidissement seule ne suffit généralement pas pour empêcher dans les fers et aciers doux le retour du fer à l'état α; le carbone seul n'est pas suffisant non plus, à moins qu'il n'y figure en forte teneur.

« *C'est en ajoutant l'action d'une teneur convenable en carbone à* « *celle d'un refroidissement brusque que l'on obtient la trempe des* « *aciers, le refroidissement brusque retarde la modification du fer et* « *empêche le changement d'état du carbone; le carbone de trempe, à* « *son tour, empêche la modification du fer.* »

Pour un même acier, l'énergie de la trempe variera avec la vitesse du refroidissement et avec la température du métal au moment de l'immersion. Et, en effet, si d'une part on fait varier le temps pendant lequel les conditions de température permettent la transformation du carbone de trempe en carbone de recuit, on fera ainsi varier la proportion de carbone qui échappe à cette transformation et par suite la proportion de fer qui garde la forme β. La température du métal au moment de l'immersion pourra être telle, d'autre part, que la modification du fer au moment où l'on trempe le barreau aura pu être commencée. Dans ce cas, l'énergie de la trempe ne sera pas maximum.

Nota. — La théorie de la trempe ainsi exposée par M. *Osmond* n'est pas différente dans ses grandes lignes de celle qui a été donnée dans la théorie cellulaire, mais elle précise davantage les phénomènes et paraît en tous cas dégagée de toute hypothèse, quelle que soit la nature exacte, encore incomplètement définie du carbone de trempe.

C. — *Comment les trempes négatives se relient-elles aux trempes positives* (1)? En fait, toutes les considérations qui précèdent ont trait aux trempes dites positives, c'est-à-dire à celles qui durcissent l'acier, augmentent E, R, etc... Nous savons d'autre part, ce qu'il faut entendre par trempes négatives; relions celles-ci aux précédentes et figurons-en les effets par un diagramme unique.

Soit un acier déterminé, pris à 1000° par exemple, et sous forme d'un barreau de dimensions assez faibles pour que les différences de température entre l'intérieur et la surface puissent être négligées pendant un refroidissement de vitesse quelconque. On suppose qu'il ait la meilleure texture possible et on lui fera prendre successivement toutes les vitesses de refroidissement pratiquement réalisées, depuis la plus grande jusqu'à la plus petite.

En tant que la trempe augmente les proportions de carbone de trempe et de fer β qui subsisteront dans l'acier refroidi, R diminue rapidement d'abord, puis de plus en plus lentement avec la vitesse du refroisement; A °/₀ au contraire suit une loi inverse.

En tant, d'autre part, que la trempe s'oppose à la formation d'un grain plus grossier, la durée du refroidissement n'a pas d'influence notable sur la résistance; mais elle diminue progressivement A °/₀.

Si donc, composant les deux phénomènes, on prend pour abcisses le temps que met la température à descendre d'une quantité fixe (soit de 700° à 600° par exemple) et pour ordonnées R et A° /₀ correspondant à chaque vitesse de refroidissement, on obtient 2 courbes figurées grossièrement ci-après.

La durée de refroidissement OM, qui correspond à l'allongement maximum, sépare les *trempes positives des trempes négatives*.

Si donc on obtient, par une trempe appropriée, une vitesse de refroidissement qui soit à la fois assez faible pour ne pas gêner notablement les transformations physico-chimiques du fer et du carbone, et assez grande pour entraver les arrangements cristallins, l'acier ainsi trempé ne sera guère plus résistant que le même acier refroidi très lentement et aura un allongement supérieur.

Si on élève la température initiale, l'acier restera plus longtemps dans la zone dangereuse où les arrangements cristallins sont possibles : la courbe des allongements s'abaissera tout entière vers l'axe des temps

(1) Extrait du mémoire sur les « *Nouveaux Procédés de trempe, Osmond* ».

[illegible] MM' [illegible]

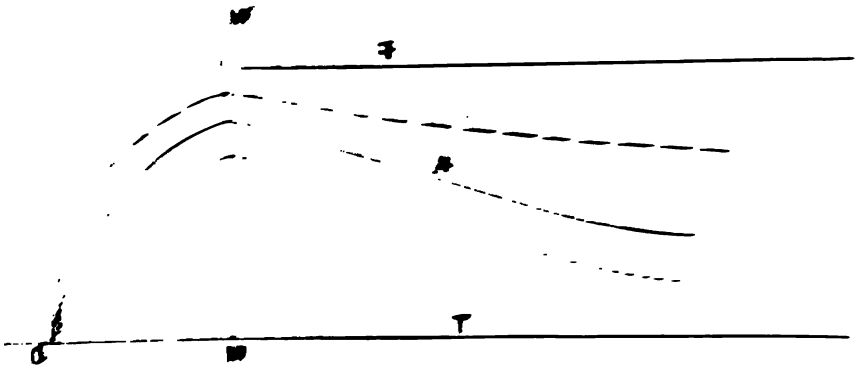


Fig. [illegible].

[illegible]

maximum l'allongement se déplacerait évidemment vers la droite : elle se déplacerait vers la gauche pour un acier plus doux.

Si on pouvait construire de pareilles courbes et connaître en même temps les lois du refroidissement dans un bloc d'acier, on saurait d'avance connaissant la vitesse du refroidissement en un point, quelles seraient en ce point les qualités mécaniques du métal. Et réciproquement, pour obtenir certaines qualités mécaniques imposées, on verrait immédiatement quels aciers peuvent remplir les conditions voulues et quelle vitesse de refroidissement il convient de leur donner.

D. *Quelques mots sur la théorie du revenu.* — Nous admettons donc que la trempe maintient le fer à l'état β et le carbone à l'état de carbone de trempe.

L'expérience montre que le revenu après trempe permet au carbone de reprendre la forme de carbone de recuit et au fer de passer à l'état α. Or, le résidu isolé par la méthode *Weyl*, s'il est chimiquement identique à celui qu'on extrait du même acier refroidi lentement à partir du rouge, en est physiquement différent. Le second est composé de paillettes brillantes d'un gris de fer et d'un aspect métallique ; le pre-

mier est une poudre noire amorphe qui doit ce changement d'aspect à son extrême division. Le carbone, pendant le revenu, s'est bien combiné au fer mais, comme nous l'avons dit antérieurement, *il s'est combiné* **in situ** *et n'a pu reprendre dans un milieu solide, à la température relativement basse de 400°, la situation d'enveloppe qu'il occupe dans l'acier naturel par rapport aux granulations de fer.*

On transforme ainsi un corps quasi vitreux, éminemment fragile, en un corps poreux hétérogène, beaucoup moins fragile.

En même temps la proportion du fer β diminue évidemment de tout le fer qui se combine au carbone; mais comme une fraction du fer β subsiste jusqu'à 660°, la dureté ne diminue pas pendant le revenu aussi rapidement que la fragilité.

Il résulte d'expériences que nous ne pouvons décrire que la régénération du carbone de recuit est presque achevée dès 400° et achevée vers 520°; le dégagement de la chaleur latente de trempe commence aux environs de 200° pour se terminer entièrement vers 520°. On a constaté que pour les aciers durs il se produisait en outre un dernier dégagement de chaleur entre 660° et 680°, c'est-à-dire très voisin de la station connue $a_{c \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}$. et ne pouvant plus être attribué qu'à la régénération du fer α.

En résumé, nous pourrons nous représenter, sauf réserves résultant des théories finales :

— *L'acier recuit au rouge* comme étant principalement constitué par le fer α, dont les granulations élémentaires sont enveloppées de carbure de fer.

— *L'acier trempé* constitué par le fer β en *masse continue* tenant le carbone en dissolution.

— *L'acier revenu* constitué par un mélange intime du précédent avec une proportion variable de fer α et de carbure de fer infiniment divisés.

Toutes les transitions, tous les intermédiaires étant d'ailleurs possibles entre ces trois types.

TITRE IV

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES DIVERS ACIERS

LES THÉORIES FINALES

Edifiée par MM. *Osmond* et *Werth*, complétée par M. *Osmond*, la théorie cellulaire n'a bientôt plus suffi pour expliquer les propriétés tout à fait nouvelles des aciers spéciaux, c'est-à-dire des aciers dans lesquels à côté du carbone se trouvent d'autres éléments plus ou moins actifs.

Des théories rivales se sont élevées; quelques objections ont été présentées contre la théorie allotropique que nous avons exposée pour analyser le phénomène de la trempe.

C'est encore et surtout aux travaux récents de M. *Osmond* que nous aurons recours pour montrer, dans un aperçu final, comment la théorie primitive qu'il avait établie a pu à nouveau relier entre eux des faits en apparence fort difficiles à expliquer.

Avant d'examiner l'influence des différents corps étrangers sur les propriétés de l'acier il importe de se rendre compte des méthodes employées pour juger de ces propriétés. Nous traiterons donc, dès le début, des essais des divers métaux dérivés du fer, en nous bornant aux notions indispensables.

Cela fait, nous aborderons l'étude des aciers spéciaux; ces métaux une fois connus, il sera rationnel de rechercher dans quelle mesure il a fallu modifier ou compléter les théories existantes afin d'expliquer les propriétés, de prime abord assez singulières, de ces aciers nouveaux.

CHAPITRE 1er

ESSAIS DES MÉTAUX

Nous nous occuperons d'abord des essais de traction.

ARTICLE 1er. — ESSAIS DE TRACTION

I. — *Valeur de l'essai de traction.*

L'épreuve de traction est un des moyens d'investigation les plus employés pour apprécier les propriétés résistantes des métaux.

Presque toutes les usines font reposer la classification de leurs produits métallurgiques uniquement sur les résultats fournis par cet essai. Nous avons dit antérieurement ce qu'il en fallait penser ; les données qu'on possède sur le poids à attribuer à cette épreuve au point de vue des qualités du métal n'étant pas établies d'une manière absolument certaine. Du reste, la discussion approfondie de cette importante question ressortit à l'étude de la « Résistance des matériaux » ; nous devons nous borner à indiquer ce qui se passe actuellement dans les usines à cet égard.

Une commission dite des « *Méthodes d'essai* »,composée d'ingénieurs, d'officiers d'artillerie et du génie, etc... a été instituée en 1892 pour étudier et discuter les méthodes d'essais concernant les matériaux de construction. Des rapports d'une importance capitale ont été établis; nous ne pouvons émettre un avis quelconque sur la probabilité de l'adoption à brève échéance des méthodes plus ou moins rationnelles qui ont été proposées pour essayer en particulier les fontes, les aciers et les fers. Le problème est en effet fort complexe; pour s'en convaincre nous renvoyons à la lecture des rapports établis par les membres les plus éminents de la *Commission* précitée.

II. — *Formes des barreaux.*

Les essais à la traction sont pratiqués sur des barreaux de forme et de dimensions réglementaires et découpés dans le métal dont on veut apprécier la qualité.

Les barreaux sont découpés à froid généralement, de manière à ne pas modifier par une opération à chaud quelconque les qualités du métal en essai.

La forme et les dimensions de ces barreaux influent sur les résultats

numériques qu'on mesure ainsi qu'il résulte de nombreuses expériences.

L'impossibilité où on se trouve de opérer autant que possible que sur des barreaux conformes à un type déterminé.

L'Artillerie a adopté un barreau type pour le *Service des forges* et un barreau type pour la *Fonderie de Bourges*. Ils sont tous deux cylindriques et terminés par 2 têtes reliées au corps du barreau par un congé ;

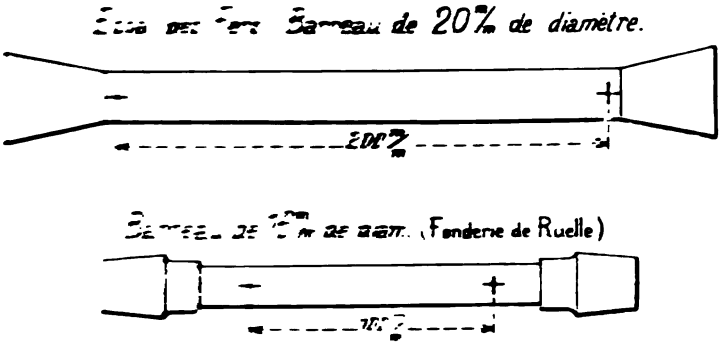


Fig. 201 et 202.

leurs dimensions sont indiquées ci-dessous. Les essais de fer se font sur barreaux plus grands.

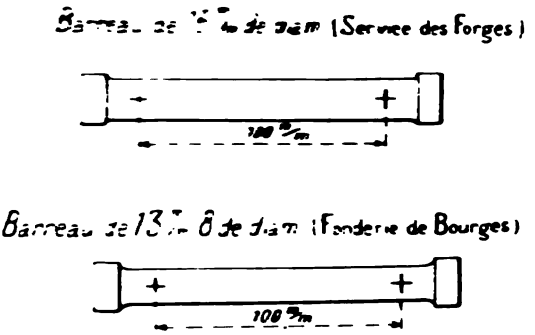


Fig. 203 et 204.

Le premier a un diamètre de 16 mm. qui correspond à une section de 220 mmq. ; le second a un diamètre de 13 mm. 8 qui correspond à une section de 150 mmq.

Cependant, comme il n'est pas toujours possible, notamment dans les pièces finies de petites dimensions, de découper un barreau de 12 cm.

de longueur totale, l'*Artillerie* a admis en prévision de ce cas les types suivants :

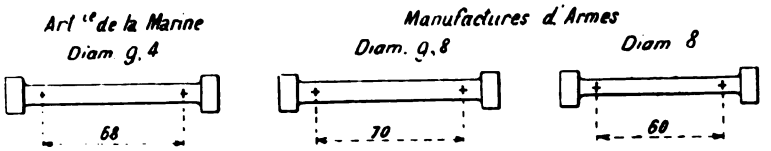


Fig. 205. Fig. 206. Fig. 207.

Lorsqu'il s'agit d'essayer les tôles on y découpe des barrettes ayant l'épaisseur même de la tôle et une largeur telle que la section transversale soit comprise entre 200 et 300 mmq. Le corps de ces barrettes a 200 mm. de longueur, il est relié à 2 têtes percées d'un trou qui servira à passer le boulon au moyen duquel on exerce l'effort de traction. L'essai de traction s'exécute en exerçant sur le barreau, au moyen d'une

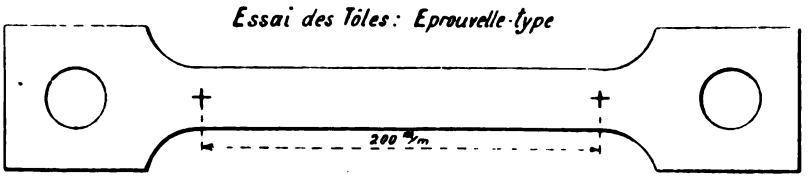


Fig. 208.

machine, une traction lente et progressive qu'on augmente jusqu'à rupture du barreau. Dans la pratique usuelle les grandeurs qu'on mesure sont E, R et A 0/0, précédemment définis.

A ces données, on ajoute souvent à titre de renseignement :

— *La striction :* c'est le rapport de la diminution de section qui s'est produite au point de rupture à la section primitive, soit : $\frac{S - S'}{S}$; S étant la section primitive du barreau, S' la section de rupture.

— *L'aspect de la cassure* comparé à des types déterminés de cassures différant par la forme, le grain, l'éclat, etc...

III. — *Machines de traction.*

Nous nous bornerons à des descriptions sommaires :

A. — *Machines à levier.* — Nous examinerons successivement la

machine à levier simple à plateau, la *romaine* et la romaine à *leviers multiples* qui sont les types les plus répandus.

1° — *Machine à levier simple à plateau.* — Le barreau est saisi par deux mâchoires reliées l'une à un point fixe K, l'autre au point A du levier OL. Ce dernier pivote autour d'un axe O et porte à son extré-

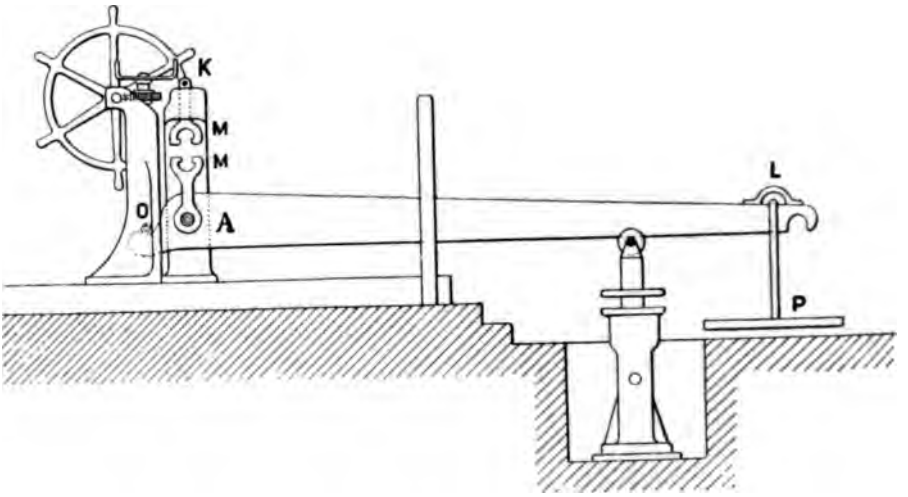


Fig. 209. — Machine à levier simple.

mité opposée un plateau P sur lequel on place un à un des poids de 20 kg. ou de 50 kg. jusqu'à rupture du barreau. On maintient constamment l'horizontalité du levier en abaissant l'axe O au moyen d'un volant.

A un moment quelconque de l'opération la somme de ces poids étant ω, la charge supportée par le barreau sera : $\omega \frac{OL}{OA}$.

Cette machine d'une constitution simple et robuste a l'avantage de ne jamais se dérégler, aussi les grandes usines ne l'ont pas complètement abandonnée, elle sert à tarer les autres machines.

Ses défauts sont les suivants :

a) La charge du plateau P varie brusquement chaque fois qu'on y ajoute un second poids : l'effort sur le barreau ne croît donc pas d'une façon continue ainsi que cela devrait être.

b) Chaque opération demande une manœuvre pénible et longue.

2° — *Romaine.* — C'est un type de machine analogue au précédent mais

dans lequel la charge est donnée par l'action d'un poids constant P qui glisse le long du levier OL muni d'une graduation qui permet de mesurer à chaque instant le rapport $\frac{OP}{AO}$.

Les manipulations sont plus faciles et moins longues qu'avec la machine à plateau. L'augmentation de charge, quoique ne procédant pas

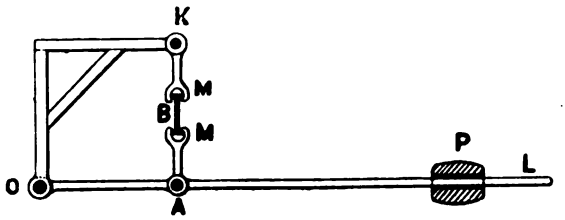


Fig. 210.

K, point fixe. — *B*, barreau. — *M*, mâchoires.

par à coups aussi forts, n'est cependant pas rigoureusement continue. Si lorsqu'on est très près de la rupture on accélère un peu trop le mouvement de P, on peut obtenir un nombre exagéré pour l'effort de traction correspondant.

3° — *Romaine à leviers multiples.* — Cet appareil est constitué par une

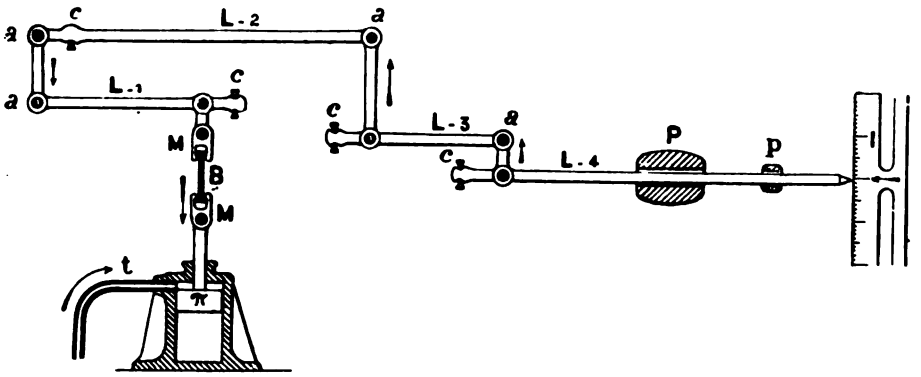


Fig. 211. — Romaine à leviers multiples.

B, barreau. — *M*, mâchoires. — $L_{1\text{-}2\text{-}3\text{-}4}$, leviers. — π pistone — *T*, tuyau d'amener. — *C*, couteaux. — *A*, articulations. — *P*, poids mobile. — *p*, poids additionnel. — *I*, index.

série de leviers L_1, L_2, L_3, L_4 reliés les uns à la suite des autres par des coudes articulés et prenant appui sur des couteaux C.

Le barreau B est pris par ses deux têtes entre deux mâchoires reliées l'une au point M du premier levier L_1 et l'autre au piston π d'un corps de pompe dont la partie supérieure peut recevoir de l'eau envoyée par un compresseur.

Cette eau pousse le piston de haut en bas et exerce sur le barreau un effort de traction croissant d'une façon continue. L'extrémité du dernier levier L_4 disposé comme une romaine tend à se soulever sous l'effort transmis par le barreau ; on fait glisser le poids P ou le poids additionnel *p* de manière à maintenir constamment L_4 horizontal ce qu'on constate au moyen d'un index I. Les poids P et *p* sont déplacés à la main ce qui demande un opérateur bien exercé surtout pour déterminer E.

Les rapports des bras de levier successifs, dans la romaine dite : « *Machine des chemins de fer* » sont les suivants : 1/5, 1/10, 1/4, 1/8 La charge du barreau peut donc être 1600 fois le poids de P.

B. — *Machines à manomètre.* — Nous étudierons seulement la machine de M. *Thomasset*, constructeur à *Paris* et celle du colonel *Maillard*, de l'artillerie de marine.

1° — *Machine Thomasset.* — La traction sur le barreau est produite par le piston H d'un corps de pompe P et transmise par le barreau même à un étrier E qui prend appui par un couteau sur un levier coudé EOF.

Un second axe O sert de pivot au levier qui transmet sur un couteau

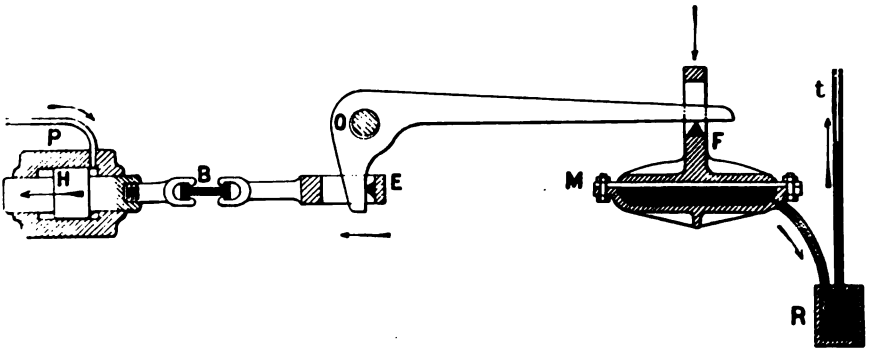


Fig. 212.

F le cinquième de l'effort de traction exercé par le barreau sur le levier. Le couteau F est fixé au plateau supérieur d'un manomètre différentiel M rempli d'eau ; ce plateau prend appui sur une large membrane de

caoutchouc et communique la pression à un récipient R rempli de mercure de manière à faire monter ce liquide dans le tube manométrique *t*.

La traction exercée par le piston H est donc équilibrée par le poids de la colonne de mercure contenu dans le tube : ce dernier est fixé sur une planche graduée. Le rapport de la section du diaphragme à celle du tube *t* est de 3.000.

Cette machine a l'avantage de faire croître progressivement l'effort de traction automatiquement équilibré par la colonne de mercure. Cependant les couteaux F et E peuvent se fausser et changer le rapport $\frac{OE}{OF}$.

Si le barreau n'est pas situé rigoureusement dans l'axe du piston, il en résulte des coincements ou une torsion qui peuvent introduire des erreurs dans l'évaluation de la charge.

2° — *Machine Maillard.* — Les deux têtes du barreau B sont saisies entre des mâchoires placées à l'extrémité des tiges des deux pistons H

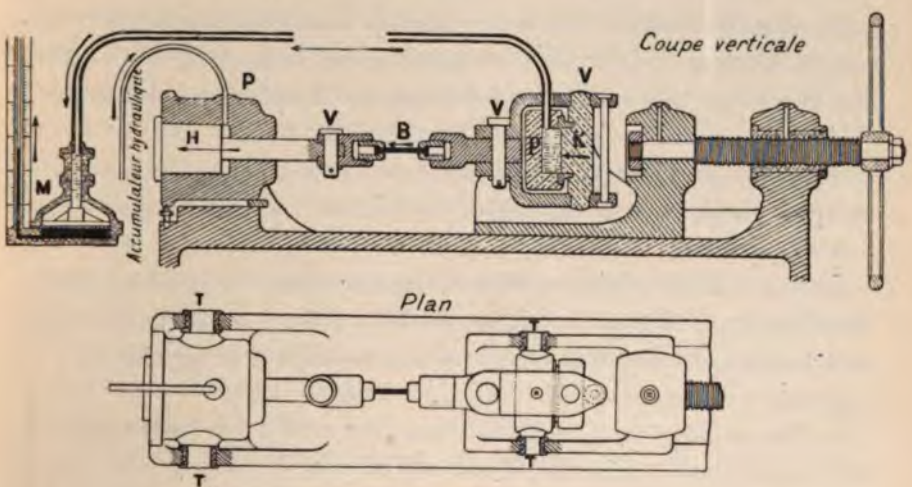


Fig. 213.

et K. Le premier subit la pression de l'eau introduite dans le corps de pompe P et exerce l'effort de traction sur le barreau B qui transmet cet effort au piston K. Ce dernier presse alors le liquide placé dans son corps de pompe *p* et le refoule sur le plateau supérieur d'un manomètre différentiel M du système *Galy-Gazalat*.

Une sorte de suspension à la *Cardan* assure la traction du barreau

exactement suivant son axe. A cet effet les corps de pompe sont supportés par des tourillons horizontaux T et les mâchoires par des axes verticaux V.

L'ensemble peut donc se déplacer de manière à permettre à chaque tête du barreau de prendre une position quelconque dans l'espace. Dès que l'action du piston H commence, les deux têtes se placent naturellement de manière que l'effort se produise suivant l'axe du barreau : les tractions ou compressions s'exercent suivant le sens des flèches.

Au Creusot, on a perfectionné, il y a quelques années, certains détails de cette machine en usage aujourd'hui dans un grand nombre d'usines.

Les pistons tournent librement autour de leur axe pour empêcher toute torsion du barreau.

Les mâchoires ont été modifiées de manière à diminuer la durée de la mise en place du barreau.

Le corps de pompe a été organisé de manière à permettre un rapprochement rapide et automatique des mâchoires après rupture d'un barreau.

Le tuyau qui relie le deuxième corps de pompe au manomètre recevait au moment de la rupture du barreau des coups de bélier qui l'endommageaient trop souvent, on l'a composé de plusieurs parties articulées.

Ces perfectionnements ont permis de donner à la machine une marche plus régulière et d'augmenter le nombre des essais en un temps donné.

Quelques bulles d'air peuvent s'introduire dans le tube qui relie le deuxième corps de pompe au manomètre ; il est bon de tarer la machine deux ou trois fois par an avec une machine à levier simple.

IV. — *Pratique des essais de traction.*

A. — *Préliminaires.* — Les barreaux cylindriques ayant été tournés aussi exactement que possible aux dimensions réglementaires on mesure généralement au palmer, à 1/10 de mm. près, le diamètre du corps de ce barreau afin d'avoir sa section avec l'approximation correspondante. On marque ensuite sur une même génératrice deux coups de pointeau fixant la longueur type du barreau et distants de 100 mm. le plus souvent, quelquefois de 200 mm. etc..., selon les prescriptions des

cahiers des charges. On engage alors les têtes dans les mâchoires d'une machine à traction.

Les barrettes pour tôles sont découpées à froid au moyen d'une machine à mortaiser et les arêtes sont adoucies à la lime. On frappe sur la ligne médiane de l'une des faces deux coups de pointeau distants de 200 mm. ou 100 mm. etc., selon les prescriptions des cahiers des charges. On mesure ensuite au palmer l'épaisseur de la barrette à 1/10 près et au pied à coulisse sa largeur avec la même approximation; on en déduit la section dans toute la partie utile, entre repères. Au moyen de boulons passés dans les trous de la barrette en essai, on l'accroche aux deux fourchettes qui remplacent les mâchoires des essais de barreaux cylindriques.

B. — *Résultats généraux des épreuves de traction.* — L'étirage d'un barreau en matière douce, c'est-à-dire susceptible de très grandes déformations permanentes peut se diviser en un certain nombre de périodes.

— *Première période dite élastique.* — Dans cette période le barreau revient à sa longueur primitive si l'on cesse l'effort de traction. Les allongements sont très petits et sensiblement proportionnels aux efforts qui les produisent ; ils sont entièrement *élastiques*, c'est-à-dire qu'avec les instruments de mesure dont on dispose généralement, ils paraissent s'évanouir quand l'effort cesse d'agir, nous admettrons qu'il en est toujours ainsi.

Reste à mesurer ce qu'on appelle la *limite élastique* E, soit la charge maximum, exprimée en kilogrammes par mmq. de la section primitive, que peut supporter le barreau sans éprouver de déformation permanente.

Pour mesurer rigoureusement E, il faudrait successivement exercer, puis faire cesser des efforts croissants de traction, et constater la limite jusqu'à laquelle il ne se produit que des allongements élastiques. C'est là une expérience qui a été répétée un certain nombre de fois, mais qui est trop longue et trop délicate pour être d'une pratique courante. Elle a cependant servi à remarquer, pendant l'essai, certains signes extérieurs observés sur la machine et qui se produisent au moment même où la limite élastique est atteinte, à savoir :

Dans les machines à levier, dès que E est atteinte, l'allongement du barreau continue à se produire sans augmentation de poids, le levier fléchit rapidement puis s'arrête.

Dans la romaine, le levier, constamment ramené à la position horizontale par un déplacement du poids mobile, fléchit tout à coup.

Dans les machines à manomètre, la colonne de mercure, qui monte assez rapidement quand la charge croît, subit un arrêt brusque au moment où cette charge correspond à E, puis reprend son mouvement ascensionnel. On note sur la planche graduée la division qui correspond à l'arrêt brusque; un barème permet d'en déduire E comme nous l'avons définie.

— *Période de déformation.* — La période de déformation est celle pendant laquelle le barreau *conserve un allongement permanent* si l'on cesse l'effort de traction.

Ne considérons pour l'instant que les machines à manomètre qui ont l'avantage d'être à *indications continues* : l'éprouvette étant étirée, l'équilibre s'établit *automatiquement*, la hauteur de la colonne de mercure indiquant à chaque instant la valeur de la tension.

Dès le début de la période dont nous nous occupons, le mercure change brusquement de vitesse : il continue de monter, mais lentement, et sa vitesse ascensionnelle décroît de plus en plus. Les allongements sont bien plus grands que ceux de la première période et sont en grande partie permanents : ils croissent plus rapidement que les efforts. Lorsque l'effort cesse d'agir, une faible partie de l'allongement disparaît; l'*allongement total* se compose ainsi d'un *allongement élastique* et d'un *allongement permanent*.

Nous avons dit que l'effort correspondant à l'arrêt ou au changement brusque de vitesse du mercure représentait E. Dans les instants qui suivent, *les allongements élastiques* produits par les efforts supérieurs à E sont sensiblement proportionnels à ces efforts, au moins pendant une durée fort appréciable.

Il arrive un moment où le mercure reste stationnaire, l'éprouvette s'allongeant sous un effort constant. On note cette hauteur qui est la hauteur *maxima* à laquelle montera le mercure, puis au moyen de barèmes établis pour chaque machine, on déduit la charge correspondante par millimètre carré de la section primitive du barreau qu'on prendra pour valeur *de la charge* ou résistance à la *rupture* R.

Puis le mercure descend et tombe tout à coup : l'éprouvette s'allonge de plus en plus sous les efforts décroissants ; elle file et enfin se brise. Cette dernière période ne s'obtient évidemment qu'avec une machine à indications continues. Avec les appareils à levier on note la charge qui

a déterminé la rupture et avec les romaines la position du poids mobile qui y correspond.

— *De la striction.* — En même temps que les dimensions longitudinales, les dimensions transversales du barreau varient, et en sens inverse.

Tant que le mercure n'a pas atteint sa hauteur maxima, le barreau reste sensiblement cylindrique ; puis les variations de dimensions se produisent surtout dans une certaine zone, à laquelle on donne le nom de *fuseau* et qui contient la section de rupture. Dans certaines nuances d'aciers, il n'y a pas qu'un fuseau ; plusieurs fuseaux peuvent s'amorcer en diverses régions de l'éprouvette sans qu'on puisse prévoir pendant la plus grande partie de la période finale quel est celui où se produira la rupture.

On prend pour mesure de la striction le rapport $\frac{S-S'}{S}$, S' étant une surface que l'on déduit de la mesure à l'aide du pied à coulisse du diamètre minimum de l'étranglement sur le barreau rompu.

Ce qui caractérise l'étirage des corps raides c'est qu'ils se brisent sans prendre de grandes déformations, c'est-à-dire sans qu'il y ait formation de *fuseau*.

Certains corps extrêmement raides, comme le verre, l'acier à outil trempé, se brisent pendant la première période élastique ; il n'y a aucune déformation permanente, et E se confond avec R.

D'autres corps très doux et très élastiques comme le caoutchouc peuvent prendre de très grandes déformations élastiques : dans ce cas, les allongements ne sont pas proportionnels aux efforts et contrairement à ce qui arrive pour les métaux, les allongements permanents sont bien plus petits que les allongements élastiques. Il est alors très difficile d'apprécier E.

— *Allongements.* — Certains appareils, la machine *Maillard* par exemple, sont pourvus de lunettes mobiles sur une règle graduée et au moyen desquelles on peut mesurer à chaque instant avec une grande approximation (1/20 de mm) la longueur du barreau entre repères. On ne se sert de ces lunettes que dans les expériences très précises.

Dans la pratique usuelle, on se contente, après avoir extrait des mâchoires les deux parties du barreau rompu, de rapprocher jusqu'au contact ces deux parties de manière à reconstituer le barreau complet au moment de la rupture. On mesure alors, à l'aide d'un pied à coulisse

la nouvelle distance $l + a$ des points de repère exprimée en millimètres, l étant la distance primitive en millimètres.

L'allongement pour cent est $\frac{a \times 100.}{l}$

Certains services ont établi, en outre, une nomenclature descriptive des différentes cassures qui se présentent dans la rupture des barreaux; les agents du contrôle peuvent ainsi sans hésitation fournir une indication caractéristique dans les procès-verbaux de leurs essais. Nous citerons le tableau des cassures de la *Fonderie de Bourges* dont il est inutile de donner la description.

C. — *Représentation graphique.* — Un point ayant pour abcisse un effort de traction et pour ordonnée l'allongement 0 0 correspondant d'une éprouvette, relativement à 2 axes de coordonnées, représentera à la fois l'effort et l'allongement. La courbe qui réunira tous les points

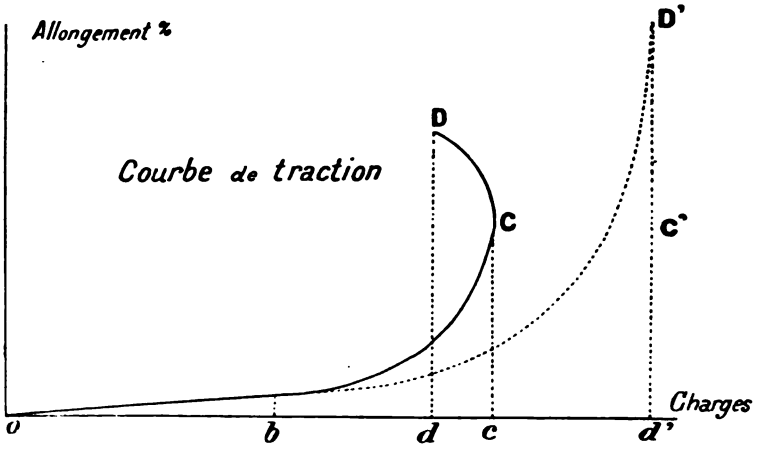


Fig. 214.

ainsi obtenus représentera les allongements en fonction des efforts de traction.

On a l'habitude de prendre pour abcisses les *efforts rapportés à la section primitive*, c'est-à-dire le quotient obtenu en divisant le nombre de kilogrammes qui représente l'effort total par le nombre d'unités de surface contenues dans la section primitive (millimètre carré).

Ces quantités ne représentent pas généralement les *tensions par unité de surface*, car la section varie en même temps que les efforts. Il arrive même souvent que la section varie inégalement dans les dif-

férentes parties de l'éprouvette ; dans ce cas, les efforts ne sont pas uniformément répartis sur la surface des sections droites et l'effort rapporté soit à la section primitive, soit à la *section actuelle* ne représente pas du tout la tension par unité de superficie. Il importe aussi de remarquer que l'expression d'allongement 0/0 n'a de signification qu'à la condition que l'allongement soit uniforme dans toute la longueur de l'éprouvette, ce qui n'arrive pas quand le fuseau s'est formé.

Ces réserves étant faites ; la partie OB de la courbe correspond à la période élastique ; les variations de longueur du barreau dites *allongements élastiques* y sont proportionnelles aux charges ou aux efforts : OB est une ligne droite et la charge O*b* mesure E. A partir du point B on entre dans la période de déformation ou d'allongements permanents. La charge maximum Oc supportée par le barreau est appelée charge de rupture ou résistance à la rupture R.

On voit bien que l'allure de la courbe O BC D semble indiquer que le point D correspondant à la rupture du barreau répond à une charge *o d* inférieure à *o c* supportée précédemment par le barreau. Cette anomalie n'est qu'apparente si on veut bien se reporter aux considérations précédemment exposées.

Les abcisses de la courbe sont en effet les charges en kilogramme par mm² rapportées à la section primitive du barreau ; or cette section diminue, d'abord en tous les points puisque le barreau s'allonge sans changer de volume, puis au point où se forme la striction et c'est en réalité la section réduite qui supporte la charge.

Si l'on voulait rapporter les charges et les allongements aux sections réelles qui les supportent, c'est-à-dire à chaque instant à la section la plus petite du barreau, la courbe changerait notablement d'allure, surtout pour les fers et les aciers doux. Elle deviendrait OBC'D' et correspondrait à la section la plus déformée.

La striction commence à se produire au point C de la courbe usuelle.

Quelle que soit la légitimité d'une méthode que la pratique a consacrée et consistant à rapporter les charges à la section primitive du barreau, il ne semble pas qu'il y ait grand inconvénient à la conserver puisque les métaux étudiés sont soumis à un essai qui est le même pour tous.

Nous terminons ici les notions générales indispensables à connaître concernant les essais de traction : nous donnerons ultérieurement quelques détails complémentaires sur ce sujet.

[illegible] — Les essais de traction sont pratiqués sur les aciers, les fers et les fontes. Pour les fontes, les barreaux d'essai sont coulés spécialement à cet effet suivant les dispositifs indiqués à l'essai de choc et [illegible] en général. Quelquefois cependant on emploie des barreaux ronds tournés ou des barreaux rectangulaires découpés dans les pièces.

Le metal dans les barreaux coulés carrés a toujours tendance à durcir aux arêtes par suite d'un refroidissement plus rapide en ces régions; en outre les arêtes viennent de fonderie plus ou moins vives et nettes. D'autre part, si les barreaux fondus ronds présentent un groupement moléculaire plus régulier, il est difficile de les couler parfaitement cylindriques. Ces causes de variations dans les résultats disparaissent quand on emploie des barreaux fondus un peu plus forts de diamètre et amenés au diamètre exact par un tournage.

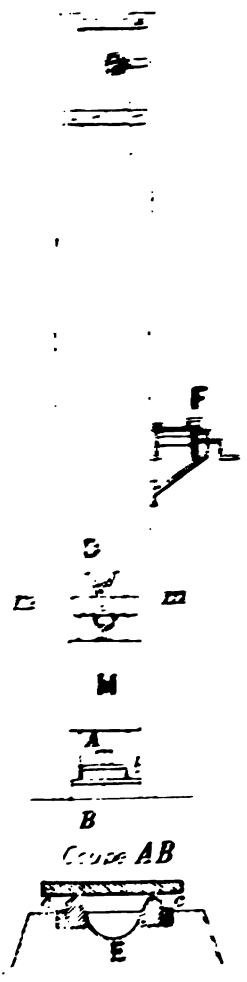


Fig. 215.

b, barreau de choc. — *M*, mouton. — *m*, montants. — *DF*, déclic. — *F*, appareil élévatoire. — *C*, couteaux. — *E*, enclume.

Article 2. — Autres essais a froid usuels

Nous examinerons spécialement les essais de *choc* et de *flexion*.

I. — *Essais de choc.*

Ces essais consistent à soumettre à l'action du choc d'un mouton un barreau prélevé sur le métal à examiner.

Les essais de traction s'exécutent pour l'acier, soit sur le métal en cours de traitement afin de juger de sa plus ou moins grande douceur et de déterminer quelle trempe il faudra lui faire subir pour modifier dans le sens voulu ses qualités après forgeage et recuit, soit sur le métal en fin de traitement.

Les essais de choc s'exécutent *d'ordinaire* pour l'acier sur des bar-

reaux découpés à froid dans la pièce dont on veut apprécier la résistance au choc, soit le plus souvent sur barreaux trempés et revenus. Ces barreaux ont généralement une longueur de 200 mm. et une section de 3 cm. de côté toutes les fois que les dimensions de la pièce le permettent.

Dans le cas contraire, la longueur et la section sont réduites.

On se sert pour essayer le barreau d'un *mouton* en fer de poids variable selon les divers cahiers des charges pouvant s'élever entre des montants verticaux à une certaine hauteur.

L'essai est conduit de la manière suivante :

Le barreau est placé horizontalement sur les couteaux ; une pince à déclic saisit le mouton et le monte jusqu'à la rencontre d'un butoir fixé à l'échelle verticale graduée. A ce moment, la pince s'ouvre et le mouton tombe, guidé par les montants.

Les quantités qu'on évalue dans un essai de choc sont :

1°) La *hauteur de chute* et le *nombre de coups* que doit supporter le barreau sans se rompre.

2°) A titre de renseignement complémentaire on mesure *la flèche f* prise par le barreau après un nombre déterminé de coups de mouton.

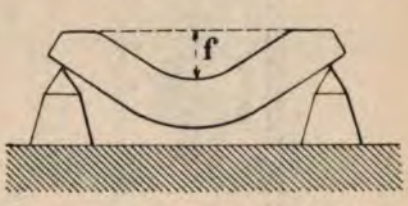


Fig. 216.

Nous donnons ci-dessous et *pour mémoire* les conditions d'un essai de choc pour la réception d'un mortier de 220 en acier imposées par la *Fonderie de Bourges :*

Distance des couteaux.	160 mm.
Elévation des couteaux au-dessus de l'enclume.	50 mm.
Rayon de la surface de frappe	60 mm.
Poids de l'enclume	350 kg.
Poids du mouton	18 kg.

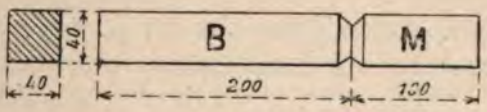


Fig. 217.

Pour l'essai des pièces en *acier moulé*, on opère sur des barreaux carrés ayant 3 centimètres de côté.

Lorsqu'il s'agit de *fonte*, le barreau B est un prisme à base carrée coulé dans un moule en sable légèrement incliné sur la verticale surmonté d'une masselotte M destinée à contenir les crasses ou impuretés

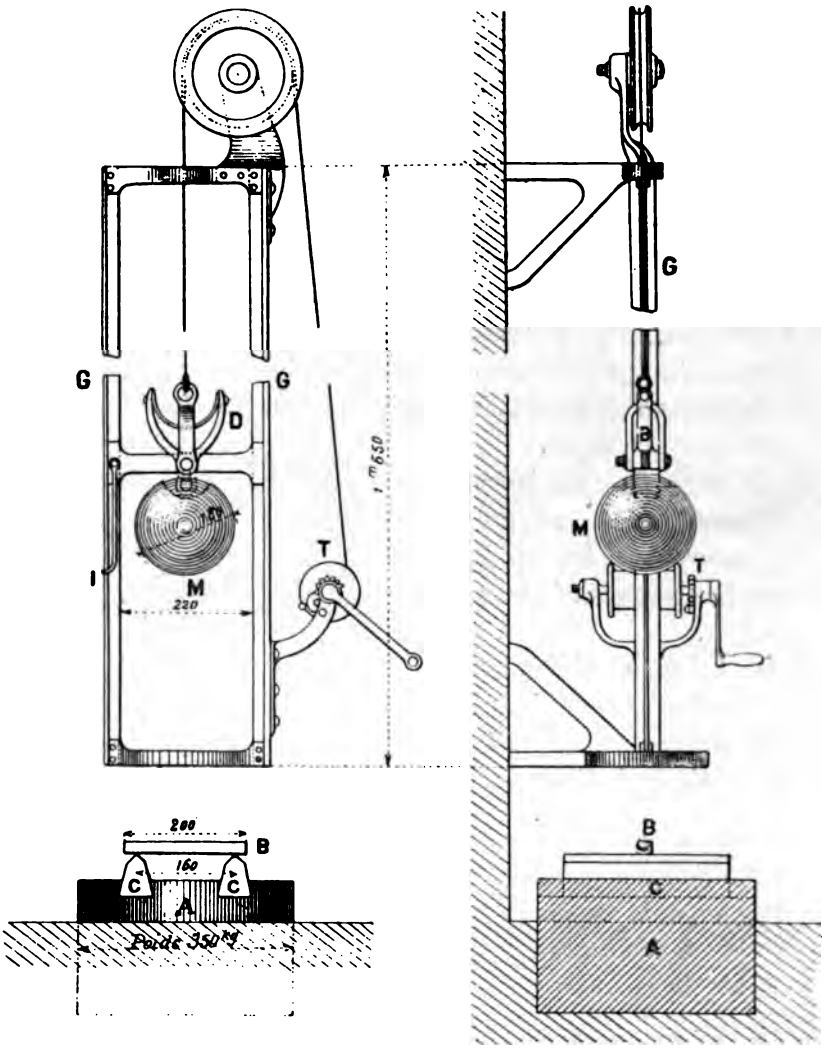


Fig. 218. — Essais au choc. — Mouton sphérique à chute libre.

A, chabotte ou enclume. — *B*, barreau d'épreuve. — *C*, couteaux. — *GG'*, montants ou guides. — *G'*, montants portant l'échelle des hauteurs. — *I*, index. — *M*, mouton. — *T*, treuil de manœuvre. — *D*, déclic.

qui tendent à surnager. Une gorge sépare le barreau de la masselotte qu'on détache à froid par un coup de marteau.

Le barreau souvent raboté, les surfaces et les arêtes ayant été quelquefois adoucies à la lime, est posé sur deux couteaux et reçoit le choc d'un mouton en fer (généralement un boulet sphérique de 12 kilos) tombant en chute libre d'une hauteur fixée pour chaque essai.

On constate si le barreau de fonte essayé se brise ou non sous un seul choc du mouton tombant du minimum adopté pour la hauteur de chute.

Dans certains essais on augmente progressivement de 5 centimètres les hauteurs de chute successives jusqu'à rupture.

Nous donnons ci-dessous les conditions généralement adoptées :

Dimensions du barreau carré.	long. .	220 mm.
	côté. . .	40 mm.
Ecartement des couteaux		16 mm.
Poids du mouton		12 kg.
Poids de l'enclume		800 kg.

Hauteur de chute : Variant suivant les cahiers des charges entre 28 et 40 cm.

II. — *Essai de flexion.*

L'essai de flexion *sur barreau* s'exécute pour apprécier principalement la résistance des fontes de moulage.

Le barreau d'épreuve est coulé dans un moule en sable légèrement incliné sur la verticale, avec masselotte, comme le barreau de choc. Il en diffère par des dimensions qui sont plus grandes :

Longueur.	450 mm.
Côté du carré	80 mm.

L'appareil employé pour cette épreuve est la balance *Monge*.

Le barreau s'appuie sur deux couteaux opposés; son extrémité est reliée par une bride et un tasseau à un long levier de près de 3 m. de long portant un plateau qu'on charge progressivement de poids de manière à faire fléchir le barreau autour d'un des couteaux (*celui qui est le plus près de l'extrémité du levier*).

Les conditions les plus générales de l'épreuve sont :

Dimensions du barreau : 450 × 80 × 80.

Distance des deux points d'appui : 150 mm.

Le barreau doit supporter sans se rompre un poids de 800 kilos placé dans le plateau.

Certaines administrations emploient, de préférence, pour essayer les

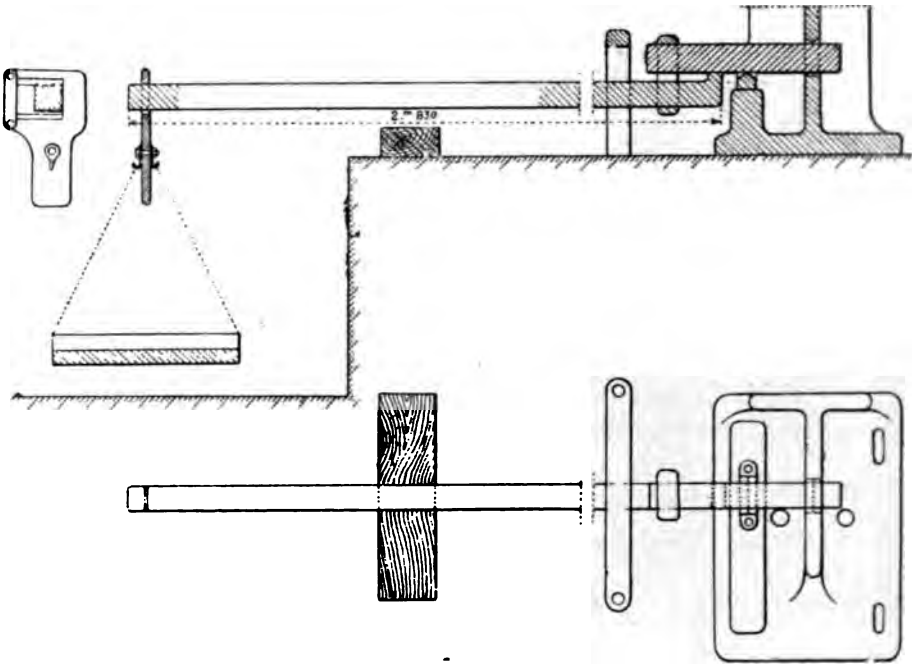


Fig. 219. — Appareil Monge pour l'essai des fontes à la flexion.

fontes à la flexion, la romaine équilibrée de M. *Joëssel* que nous ne faisons que signaler. Il importe toutefois de retenir que l'appareil *Monge* ne permet pas de lire les flèches prises par le barreau avant sa rupture. Ces flèches sont, par contre, facilement appréciables avec la romaine de M. *Joëssel* qui les amplifie à l'aide d'un appareil automatique enregistreur donnant le diagramme des flèches que prend le barreau d'épreuve sous les charges variables et progressives auxquelles il est soumis.

Pour les aciers, les essais à la flexion ne s'exécutent d'ordinaire que sur des pièces finies ; on distingue trois genres de machines employées dans ce but et que nous indiquons seulement :

Les machines à essayer les rails ;

Les machines à essayer les ressorts ;

Les machines à essayer, par ployage, les matériaux de petites dimensions.

Ou bien les pièces qu'on essaye à la flexion ont une limite élastique très élevée, *les ressorts par exemple*, et alors la machine les soumet à une flexion bien supérieure à celle qu'elles auraient à supporter dans la pratique, ou bien leur limite élastique est moins forte, *essieux en acier mi-dur trempés et revenus*, et alors il faut les soumettre à un effort

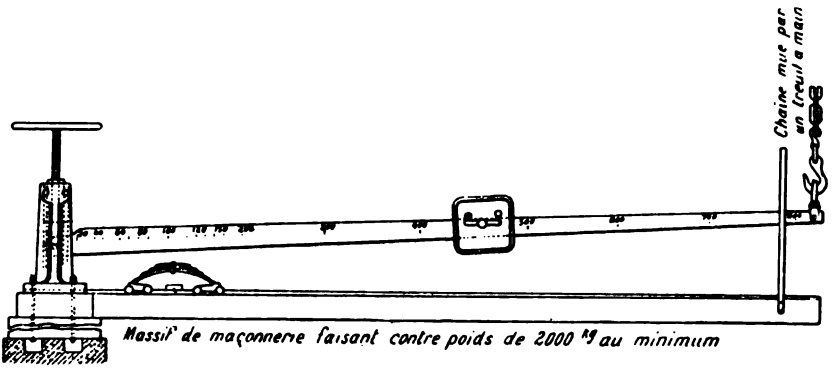


Fig. 220. — Machine pour l'essai à la flexion des ressorts et des aciers à ressorts.

de flexion tel que la limite élastique du métal ne soit pas atteinte. En opérant ainsi il ne devrait pas y avoir théoriquement de déformation permanente; si on en constate une, elle devra être resserrée entre des limites très étroites variables selon les fabrications et les divers cahiers des charges.

Signalons aussi l'emploi pour les essais à la flexion, à l'aide de dispositifs complémentaires très simples, des machines d'essai à la traction et surtout de celles construites spécialement pour les essais à la compression.

Il existe toutefois peu de machines combinées spécialement pour l'essai à la compression rarement exécuté, car presque toutes les machines d'essai à la traction peuvent servir pour faire un essai à la compression lorsqu'on y attelle un *appareil de reversion*.

A l'essai de flexion se rattache directement l'essai de *ployage*.

La mesure de l'allongement, dans les essais de traction, se fait sur une longueur de 100 à 200 mm. dans la plupart des cas ; elle donne *l'allongement moyen pour cette longueur*.

Or, la déformation permanente n'est pas la même sur toutes les sections droites comprises entre repères, elle est maximum à l'étranglement de la striction. Dans les essais courants de traction on ne mesure pas cet

allongement maximum que peut subir le métal avant de se rompre. Cependant il y a intérêt dans certains cas, à l'évaluer approximativement ; c'est ce qu'on fait par *l'essai de ployage* pratiqué sur les tôles ou sur des lames prélevées à froid dans le bloc de métal examiné.

Le *ployage* est pratiqué soit à la presse, soit au marteau ; il a pour effet de provoquer un allongement considérable du métal vers le sommet de la partie convexe de la lame pliée. Suivant les dimensions de la lame ou de l'échantillon de tôle, suivant la nature du métal, on mesure soit l'angle *a b c* des deux parties rectilignes de la lame, soit le rayon de courbure intérieure *r* de la partie ployée autour d'un mandrin. Dans chaque cas déterminé, le cahier des charges fixe l'angle de ployage ou le rayon de courbure auxquels on doit arriver sans qu'il se produise de criques dans la partie du métal qui s'allonge le plus. Il y a lieu de fixer aussi l'état dans lequel doit se trouver le métal de la lame essayée avant l'épreuve : recuit, trempe, etc...

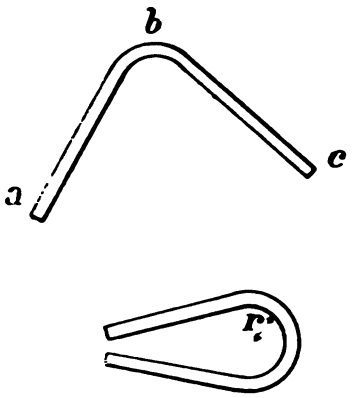


Fig. 221 et 222.

Nota. — *Les essais de torsion* sont peu usités comme conditions de réception, parce que l'expérience a appris que de bons éléments de résistance à la traction impliquent dans les métaux une bonne résistance à la torsion et que les coefficients de sécurité ne paraissent pas différer beaucoup dans les deux cas. En outre, on n'impose pas, en général, aux pièces mécaniques de grands efforts de torsion.

Le petit nombre des machines d'essai à la torsion paraît avoir été construit plutôt en vue de recherches théoriques que pour une utilisation pratique.

III. — *Essais divers.*

Suivant l'usage auquel une pièce finie est destinée il y a souvent lieu de pratiquer des essais particuliers dont nous donnons ci-dessous quelques exemples.

A. — *Aciers à outils.* — On apprécie, en général, la qualité d'un lot de barres d'acier destinées à fabriquer des outils en prélevant sur quelques-unes de ces barres une quantité suffisante de métal pour forger un outil par barre. Ces outils sont trempés, affutés, etc..., on les essaie ensuite en exécutant avec eux le travail auquel on les destine.

B. — *Essais hydrauliques.* — Il y a intérêt, dans certains cas, notamment en ce qui concerne les obus, à vérifier par un essai individuel la résistance de toutes les pièces d'un lot, afin d'éviter les accidents graves qui pourraient résulter d'un défaut local existant dans quelques-unes de ces pièces, défaut qui échapperait au contrôle par lot. C'est ainsi que les obus à grande capacité, les chaudières de machines, les réservoirs à air comprimé pour torpilles, sont essayés en y comprimant de l'eau sous une pression dont le minimum est fixé par le cahier des charges. La déformation permanente qui peut en résulter ne doit pas dépasser une certaine limite également fixée.

C. — *Essais à la poudre.* — Dans le même ordre d'idées on a été conduit à faire sur les canons de fusil des essais à la poudre dont l'étude un peu spéciale ressortit à un cours de fabrication d'armes portatives.

Article 3. — Notions complémentaires sur les essais mécaniques

En réalité, l'étude des essais mécaniques présente de très sérieuses difficultés. Nous ne saurions nous appesantir sur cette question si importante sans sortir de notre sujet, nous nous contenterons d'indiquer les principaux résultats acquis ou les divers points encore en controverse.

I. — *Existe-t-il une limite d'élasticité?*

La question de savoir si en réalité il existe une période pendant laquelle la déformation est momentanée a été longtemps controversée. Le bon sens empêche cependant d'y répondre négativement, puisque la permanence absolue des formes des ouvrages métalliques convenablement calculés, démontre chaque jour le caractère temporaire de certaines déformations; par exemple, les diminutions des flèches des arcs métalliques pendant le passage des trains de chemins de fer.

La pratique directe de ce fait, dans un laboratoire d'essais de métaux, présente toutefois de grandes difficultés : nous signalons cependant l'emploi de plus en plus répandu des *élasticimètres* qui enregistrent l'allongement élastique de la fibre neutre en intéressant les allongements de 4 génératrices, situées 2 à 2 dans des plans diamétraux perpendiculaires entre eux.

La limite élastique est, en fait, très difficile à déterminer ; certains expérimentateurs prétendent même qu'elle n'existe pas, toute charge si faible qu'elle soit produisant toujours une déformation permanente que l'imperfection de nos instruments de mesure seule nous empêche de constater. Cependant, en pratique industrielle, il est évident, pour les raisons données au début de la note, qu'il y a lieu de considérer cette limite élastique comme existant réellement.

Un fait admis généralement c'est que lorsque les charges sont petites, les allongements leur sont proportionnels : cette proportionnalité cesse de se manifester dès que la charge atteint une certaine valeur que l'on a souvent appelée *limite des allongements proportionnels* ou *limite de proportionnalité*. Il semble que la *limite élastique* est légèrement inférieure à la *limite de proportionnalité ;* celle-ci comme la 1re ne peut être appréciée d'une façon certaine qu'avec des instruments de précision.

Il importe aussi de signaler une nouvelle distinction théorique.

Dans l'essai de traction, nous avons défini la *limite élastique théoriquement* et nous avons dit en outre qu'elle était facilement mesurable dans les machines à manomètre soit par l'arrêt ou même la chute partielle de la colonne mercurielle et dans les machines à levier par la chute de ce levier. La charge correspondant à chacun de ces phénomènes est-elle bien celle qui correspond, soit *à la limite élastique théorique*, soit *à la limite de proportionnalité*. Il semble d'après de récentes expériences qu'il y a tout au moins une différence entre cette limite qui traduit un phénomène spécial dans le barreau et la limite de proportionnalité.

Ces distinctions, inutiles aujourd'hui à considérer en l'état actuel des instruments de mesure industriels, seront peut-être d'une grande importance dans les études futures concernant les déformations des métaux.

Pour le moment, nous devrons nous en tenir, pour ce qui concerne E, aux définitions adoptées communément, ainsi qu'aux procédés de mesure industriels que nous avons donnés.

II. — *De l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des aciers.*

Nous analyserons rapidement le rapport établi par M. *A. Le Chatelier* sur cette importante question et publié par la Commission des méthodes d'essai.

Le rapport de M. *Le Chatelier* se divise en trois parties :

1°) Etude de l'influence des températures supérieures à 100°;
2°) Etude de l'influence des températures inférieures à 100°;
3°) Etude de l'influence des variations de la température atmosphérique.

a) Influence des températures supérieures à 100°. — Les *essais de traction* aux températures élevées sont difficiles à pratiquer car les métaux conduisant tous bien la chaleur,les barreaux d'essais qui ont toujours une assez forte section se refroidissent continuellement par l'intermédiaire des mâchoires qui les fixent sur la machine d'épreuve. Il ne nous appartient pas de décrire les divers procédés employés pour obtenir un chauffage régulier, ni les artifices auxquels on a recours pour les différents détails d'exécution; nous ne signalerons que les résultats acquis.

Les courbes ci-après représentent les résultats donnés par du fer de *Suède* et deux aciers de *Saint-Chamond*. Les courbes de traction lente sont relatives à des essais d'une durée moyenne de 5 à 6 minutes.

On constate avec *la traction lente* que R décroît jusqu'à 60° environ pour le métal doux ou jusqu'à 80 à 100° pour le métal un peu plus dur, puis R croît jusqu'à un maximum qui est atteint vers 250° pour décroître très rapidement à partir de 300°. La différence entre les résistances à 250° et à 15° est à peu près constante quelle que soit la dureté du métal, elle varie entre 8 et 10 kilog.

L'allongement proportionnel varie en sens inverse de R ; à 250°, il a à peu près la même valeur pour tous les fers et aciers soit 8 à 10 0 0, alors que sa valeur à 15° est de 17 à 20 0/0 pour les fers et de 25 0 0 pour les aciers doux. Il croît un peu à partir de 300°, atteignant 12,5 à 15 0 0, mais les différences de température qui existent aux tempé-

ratures plus élevées entre les divers points du barreau rendent sa mesure peu exacte.

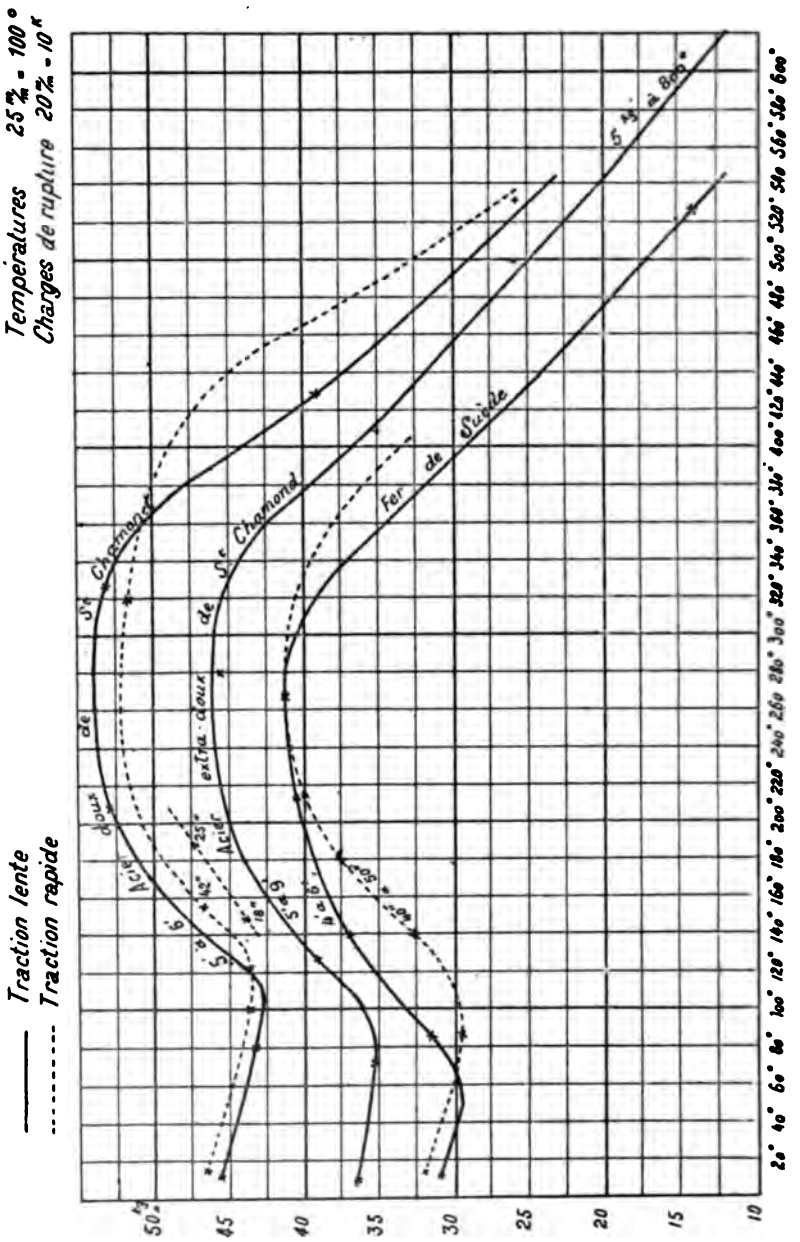


Fig. 223. — Essais de traction au-dessus de 100°. — Fer et acier. — Charges de rupture.

L'allongement total entre repères croît d'une manière continue dès 300°.

La striction décroît sans cesse de la température ordinaire jusqu'à 300 ou 350°. Dès 400°, elle augmente rapidement et devient très forte quand on atteint 700 à 800°. Les essais faits sur les aciers extra-doux de *Saint-Chamond* montrent qu'à 350° elle est deux fois et demie plus faible qu'à 15°,ce qui constitue une réduction considérable de la ductilité.

Les courbes précédentes montrent, en outre, l'influence de la durée des essais; entre 100 et 250° les essais les plus rapides donnent pour R les valeurs les plus faibles et pour A les valeurs les plus grandes; l'inverse se produit au-dessus de 300°. Ceci résulte de ce que ces variations qu'éprouvent les propriétés mécaniques des fers et des aciers à partir de 60 à 80° sont causées par une transformation moléculaire de nature inconnue se produisant sous la double influence de la chaleur et des déformations permanentes et d'autant plus vite que la température est plus élevée.

On voit donc que dans le cas d'efforts très rapides la résistance sur laquelle on peut compter est bien plus faible que celle qui résulte des essais de traction lente.

Cette transformation moléculaire qui se produit à partir de 60 à 80° s'effectue lentement au-dessus de 300°, aussi les essais les plus rapides donnent-ils alors les résistances les plus élevées et les allongements les plus faibles. *La fragilité* du fer et de l'acier vers 200 à 300° paraît résulter uniquement de la forte réduction qu'éprouve la ductilité à ces températures. Mais cette température à laquelle correspondra la plus grande fragilité variera beaucoup avec la rapidité des efforts; pour des efforts lents, elle sera voisine de 300 à 350°; pour des efforts rapides, elle pourra atteindre 500°.

b) *Influence des températures inférieures à 100°.* — Le fer et l'acier sont les seuls métaux sur lesquels les températures inférieures à 100°, surtout les basses températures, ont une action spéciale; leur fragilité augmente beaucoup au-dessous de 0°.

Au *Canada*, M. *Schreiber*,en comparant le nombre de ruptures pendant 6 mois d'été et pendant 6 mois d'hiver, a trouvé :

Rails d'acier. . . .	1 en été pour 30 en hiver
Rails de fer	1 en été pour 45 en hiver
Roues en fonte. . .	1 en été pour 3,5 en hiver.

En Russie, on a fait des constatations analogues.

On n'a pu jusqu'à présent donner aucune explication de ce phénomène, ni même bien en préciser la nature.

Pour ce qui concerne les essais de traction et de choc, les essais les plus complets ont été faits par le capitaine d'artillerie *Bernardon* à la Fonderie de *Bourges*.

L'influence des températures inférieures à 100° sur les propriétés mécaniques des fers et des aciers est très faible quand il s'agit d'efforts lents; elle est au contraire considérable quand il s'agit de chocs ou d'efforts rapides. Dans ce cas, la fragilité s'accroît à mesure que la température devient plus basse. On est conduit à penser, d'après un certain nombre de faits observés, que des variations faibles de température, de 10 ou 20 degrés par exemple, suffisent à modifier dans une large mesure la fragilité.

c) *Influence des variations de la température atmosphérique.* — Pour ce qui concerne les essais de traction, les variations de la température atmosphérique ne peuvent avoir que des effets négligeables.

Pour les essais de choc, il paraît ne pas en être de même; aussi pour la pratique des essais et afin que les résultats soient toujours comparables, le seul procédé d'une réalisation facile serait de réchauffer ou de refroidir à + 15° les pièces ou barreaux à essayer en les immergeant un temps suffisant dans de l'eau maintenue à cette température. Cette température de 15° étant toujours peu différente de la température atmosphérique se maintiendra à peu près pendant la durée de l'essai. Mais la température initiale n'est pas seule à considérer; en effet des chocs successifs produisent un échauffement considérable, de sorte que la fragilité du métal essayé devient de plus en plus faible à mesure que l'essai se poursuit. Il pourra donc être nécessaire, dans un essai bien compris, de ramener la pièce à la température de 15° dès qu'elle la dépassera sensiblement. Le mieux sera donc de réduire le nombre des coups de mouton au minimum; ceci a d'autre part l'avantage de conduire à augmenter la hauteur de chute, et par suite de se placer dans des conditions où le métal est le plus fragile. Le meilleur essai de choc est donc pour cette double raison celui qui s'exécute en un ou deux coups de mouton au plus.

III. — *Influence de la durée sur les résultats des essais des métaux.*

Nous extrayons d'un rapport de M. A. *Le Chatelier* (Commission des méthodes d'essai) les conclusions suivantes :

L'influence de la durée des efforts sur les propriétés mécaniques des métaux résulte de ce que les déformations produites par les efforts auxquels ils sont soumis ne sont pas instantanées ; un effort donné produit donc une déformation d'autant plus faible qu'il agit moins longtemps, sans qu'il y ait cependant proportionnalité entre la déformation et la durée d'application de l'effort ; la majeure partie de la déformation, sauf dans le cas où l'effort est suffisant pour amener la rupture, se produit dans un temps très court. Les conséquences de ceci sont que, on obtiendra des charges de rupture R d'autant plus élevées que l'essai sera plus rapide et que la résistance dynamique ira en croissant avec la vitesse du choc.

Pour le fer et l'acier, il doit être tenu compte de l'influence exercée. même à la température ordinaire, par la durée de l'essai sur les valeurs de la charge et de l'allongement de rupture ; néanmoins, ces valeurs ne varient pas très rapidement avec cette durée tant qu'elle ne devient pas sensiblement inférieure à une minute, et l'on peut considérer comme comparables les résultats d'essais dont la durée restera comprise entre 1 et 5 minutes ; mais il est bien entendu que dans un même essai la vitesse de traction doit rester uniforme du commencement à la fin. On peut chercher à rendre uniforme, soit la vitesse d'allongement, soit la vitesse de croissance des charges ; comme il s'agit d'obtenir avant tout des essais comparables entre eux, il faut choisir le procédé dont la réalisation est la plus simple, c'est sans aucun doute celui qui consiste à opérer avec une vitesse d'allongement constante.

Il y a lieu enfin de remarquer que, pour tenir compte de l'échauffement que subissent les éprouvettes de traction, échauffement variable avec leur volume, on doit opérer d'autant plus lentement que ce volume est plus grand.

Article 4. — Essais a chaud.

Lorsqu'un métal en barres, en tôles, etc... doit subir des déforma-

tions à chaud pour arriver à l'état de pièce finie, il faut encore s'assurer par des épreuves spéciales qu'il pourra aisément supporter ce travail.

L'épreuve sera décisive si la fatigue imposée à certains points du métal est au moins égale à celle que lui fera supporter le travail qu'il doit subir. On cherche donc à produire dans l'essai un travail analogue à celui qui doit être fait dans la pièce, mais sous des conditions d'autant plus dures que le métal est de meilleure qualité.

C'est ainsi que pour les fers en barres on plie, on étire, on refoule, on perce, on soude le métal à chaud. Pour les tôles, on exécute des ployages et des emboutissages. Il est bon de remarquer que dans ces épreuves faites à la main, le résultat peut dépendre beaucoup de l'habileté de l'ouvrier ; elles ne donnent donc pas un critérium absolu.

On peut dire cependant que si un ouvrier inhabile peut ne pas réussir l'essai avec un bon métal, un ouvrier adroit ne parviendra pas à le réussir avec un mauvais métal.

Nous donnons ci-dessous la description de quelques épreuves.

I. — *Fer puddlé.*

A. — *Crochets.* — Forger ou laminer avec le fer à éprouver une barre ronde de 16 mm. et la chauffer au rouge. La courber à angle droit, la redresser, la courber en sens inverse, la redresser de nouveau et ainsi de suite en comptant un crochet chaque fois que l'extrémité se déplace de 90° et jusqu'à ce que le métal se brise.

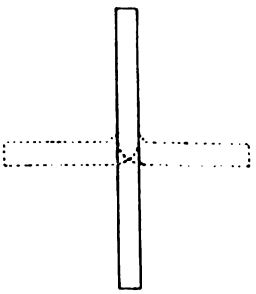


Fig. 224.

Quand le fer était employé pour les essieux (1) d'artillerie, il devait faire à chaud sans se criquer 25 crochets au minimum.

B. — *Rabattements, perçage avec rabattement.* Cet essai est pratiqué sur des barres plates ou sur des tôles épaisses.

Chauffer au rouge cerise très clair (*blanc de lune*), faire suivant la largeur de la barre une ou deux entailles *ab*, *cd* avec une tranche.

(1) On emploie aujourd'hui l'acier forgé mi-dur trempé et revenu, métal doué d'une grande résistance et très élastique. Chaque essieu est soumis à une épreuve individuelle de flexion sans que l'effort exercé dépasse la limite élastique de flexion.

Rabattre sur les côtés de la barre les deux lames extrêmes. Rabattre sur le plat de la barre la lame du milieu dans le cas où il y aurait eu deux coups de tranche.

Avec les fers supérieurs, cette épreuve doit se faire en une seule

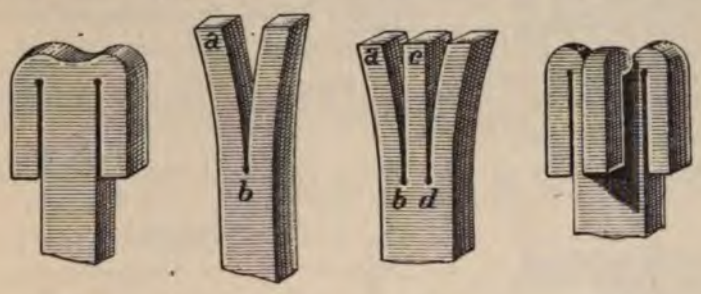


Fig. 225. Fig. 226. Fig. 227. Fig. 228.

chaude et sans que le métal présente de traces de déchirure, même suivant les fibres qui ont subi le plus grand allongement. Avec les fers de qualité moyenne, l'essai se fait en 2 chaudes.

Pour les *perçages avec rabattement*, chauffer la barre au rouge cerise

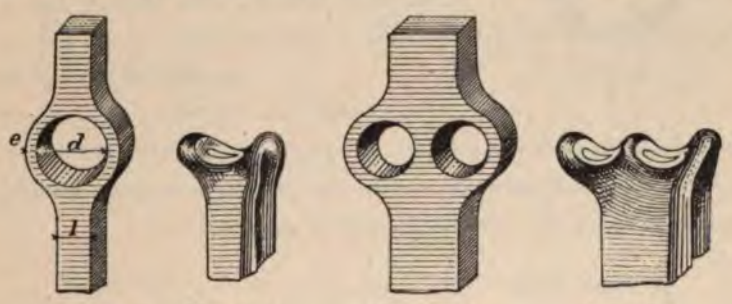


Fig. 229. Fig. 230. Fig. 231. Fig. 232.

très clair, percer avec un poinçon un ou deux trous dont les dimensions sont données en raison de la largeur de la barre et de la qualité du métal.

Plier la barre à bloc autour d'un diamètre du ou des trous percés : le ployage devant s'effectuer au rouge sombre.

On ne doit observer aucune crique, ni déchirure, ni dessoudure.

C. — *Emboutissages, pliages à chaud, soudure.* — Les tôles, qui doivent le plus souvent être déformées par emboutissages, subissent

un essai particulier. Suivant la qualité des tôles, on forme à chaud avec un morceau de la tôle à examiner :

1°) *Tôles fines* — une cuvette à angle presque vif.
2°) *Tôles ordinaires* — une calotte sphérique avec bords plats.
3°) *Tôles communes* — un cylindre.

Les dimensions de ces essais sont fixées en raison de la nature et de l'épaisseur de la tôle.

Le pliage à chaud est une épreuve faite également sur les tôles et

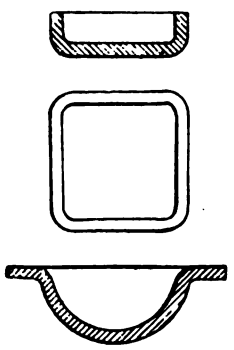


Fig. 233.

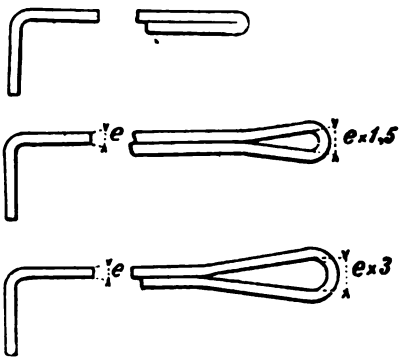


Fig. 234.

poussée d'autant plus à fond que la qualité doit être meilleure. Les figures ci-contre indiquent les rayons de pliage qu'on peut atteindre en fonction de l'épaisseur, suivant la qualité de la tôle.

1° *Tôles fines*,
2° *Tôles ordinaires*,
3° *Tôles communes*.

On ne doit pas observer de gerçure.

L'épreuve de soudure consiste à souder 2 morceaux d'une même barre ou de 2 barres différentes et à leur faire subir à la soudure même l'épreuve des trous ou une épreuve de torsion qui ne doivent pas donner lieu à la moindre dessoudure.

En dehors de ces essais qui s'appliquent en général aux tôles, barres, profilés etc., il existe certains essais spéciaux dont les cahiers des charges donnent le détail et qu'il ne nous appartient pas de signaler.

II. — *Acier.*

Les essais à chaud ont en général moins d'importance pour l'acier que pour le fer puddlé en barres destiné à fournir par forgeage à la main ou aux petits marteaux toutes sortes de menues ferrures. Quand ces essais d'aciers sont faits à la main, ce qui est habituel, leurs résultats sont plus variables que pour le fer et dépendent beaucoup de l'habileté de l'ouvrier.

Si l'on ne limite pas le nombre des chaudes, un ouvrier habile les réussira presque toujours.

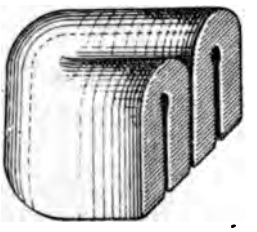


Fig. 235.

Nous estimons que les exemples donnés pour le fer suffisent pour se faire une idée des essais que l'on peut pratiquer : rien ne vaudra du reste dans chaque cas l'étude approfondie du cahier des charges. Signalons toutefois *l'épreuve du double pliage* employée ordinairement pour les tôles. Un morceau de tôle carré ayant comme côté 20 fois son épaisseur est plié une première fois à bloc. La tôle ainsi doublée est ensuite pliée sur elle-même.

On ne doit pas observer de criques.

CHAPITRE II

RAPPORTS EXISTANT ENTRE LA COMPOSITION CHIMIQUE ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ACIERS

Les notions générales sur les essais auxquels on peut soumettre les métaux pour apprécier leur qualité étant acquises, nous pouvons maintenant procéder à l'étude des rapports existant entre la composition chimique et les propriétés mécaniques des aciers.

Notions préliminaires.

I. — *Loi de Roberts-Austen.*

Les corps étrangers introduits dans l'acier peuvent exercer leur influence de deux manières, soit en agissant pour les accélérer ou les retarder sur les transformations du fer et du carbone, soit en formant avec eux des composés dont les propriétés particulières se font sentir plus ou moins dans la masse du métal.

L'action de ces corps étrangers a d'abord été constatée par expérience à la suite d'essais à la traction et au choc : divers savants ont ensuite cherché à analyser cette influence.

Le professeur *Roberts-Austen*, membre de la Société royale de *Londres*, ayant étudié l'effet produit sur les propriétés mécaniques de l'or par l'addition d'un même poids de 17 autres métaux (0,20 0/0 environ), put formuler à la suite de ces travaux, une curieuse relation entre les résultats obtenus et la position des métaux alliés dans la classification périodique de *Mendéléeff* dont nous rappellerons plus loin la définition.

Dans une conférence tenue à *Newcastle*, en 1889, le savant professeur laisse entrevoir qu'une relation analogue pourrait exister pour le fer.

« *Dans le cas du fer*, dit-il, *il est difficile de désigner quelle propriété* « *du métal sera la plus affectée par l'addition du corps étranger. La* « *relation avec la loi périodique se retrouvera peut-être dans la propriété* « *que possède un élément donné de retarder ou d'avancer la transforma-* « *tion du fer ordinaire en sa variété allotropique, mais l'avenir de l'acier* « *dépendra du soin avec lequel nous examinerons la nature de l'influence* « *exercée sur le fer par divers corps étrangers et les règles qu'il con-* « *vient de suivre dans l'application méthodique de la chaleur au traite-* « *ment de ce métal.* »

II. — *Sur la classification périodique de Mendéléeff.*

Et d'abord, on sait que le rapport constant existant entre le volume du composé formé par un corps avec l'hydrogène ou le chlore et le volume de l'hydrogène ou du chlore entrant dans la combinaison définit la *valence* de ce corps.

Une classification des métaux qui serait fondée uniquement sur la valence, comme on le fait généralement pour les métalloïdes, serait insuffisante. Les métaux sont beaucoup plus nombreux que les métalloïdes, leur partage en quatre familles laisserait dans chacune d'elles un trop grand nombre d'éléments pour que la comparaison de leurs propriétés fût possible. Du reste, la distinction qu'on fait d'ordinaire entre les métalloïdes et les métaux est tout à fait arbitraire.

Une classification générale des éléments paraît s'imposer.

En 1869, le chimiste russe *Mendéléeff* a montré *que les valences des éléments dont les poids atomiques étaient rangés par valeur croissante se reproduisaient périodiquement et que les propriétés physiques de ces éléments étaient une fonction périodique des poids atomiques.*

Le tableau ci-après qui résume la classification périodique a été dressé en distribuant les éléments par poids atomiques croissants en sept colonnes verticales, correspondant aux valences 1, 2, 3, 4, 2, 1.

Or, tous les éléments ne nous sont pas connus ; lorsque dans la distribution des corps simples, un élément de valence correspondant à la colonne dans laquelle il devrait prendre place, fait défaut, on laisse une *lacune.*

Ainsi, entre le gallium $Ga = 69,9$ et l'arsenic $As = 74,9$ existait une lacune, la différence $74,9 - 69,9 = 5$ était supérieure à celle qu'on observait entre deux éléments consécutifs des autres séries horizontales voisines ; la lacune a été comblée par la découverte du germanium.

Quelques éléments de valence paire forment des groupes compacts, dans lesquels les poids atomiques ne subissent que de très faibles variations : tels sont les groupes des métaux du fer, du palladium et du platine. On les a disposés dans une huitième colonne.

Au lieu de distribuer les poids atomiques par lignes horizontales, il est plus naturel de les disposer suivant des lignes inclinées, telles que si on enroule le tableau sur un cylindre, les éléments se trouvent disposés en une série continue sur une hélice.

H=1	I	II	III	IV	III	II	I	II		
	Li 7.01	Gl 9.08	B 10.9	C 11.97	Az 14.01	O 15.88	Fl 19			
	Na 22.99	Mg 23.94	Al 27.04	Si 28	Ph 30.96	S 31.98	Cl 35.37			
	K 39.03	Ca 39.91	Sc 43.97	Ti 48	V 51.1	Cr 52.00	Mn 54.8	Fe 55.88	Ni 58.56	Co 58.74
	Cu 63.18	Zn 64.88	Ga 69.9	Ge 72.32	As 75	Se 78.87	Br 79.76			
	Rb 85.2	Sr 87.3	Y 89.6	Zr 90.4	Nb 93.7	Mo 95.9	lacune	Ru 101.5	Rh 103.2	Pd 106.3
	Ag 107.66	Cd 111.7	In 113.4	Sn 117.35	Sb 119.6	Te 126.3	I 126.54			
	Cs 132.7	Ba 136.86	La 138.5	Ce 141.2	Di 145	lacune	lacune			
	lacune	lacune	Yb 172.6	lacune	Ta 182	Tu 183.6	lacune	Os 190	Ir 192	Pt 194
	Au 196.2	Hg 199.8	Tl 203.7	Pb 206.39	Bi 207.5	lacune	lacune			
				Th 231.96		U 239.8				

Considérons, par exemple, la seconde série dont nous connaissons.

pour chaque élément, la densité à l'état solide et écrivons en nombres ronds les poids atomiques pour simplifier les calculs.

Na'	Mg''	Al'''	Si''''	Ph'''	S''	Cl'
23	24	27	28	31	32	35,5

Au-dessous de chaque élément, écrivons la densité à l'état solide, on aura : 0,97 — 1,74 — 2,56 — 2,49 — 2,3 — 2,04 — 1,38.

On déduira pour les volumes atomiques :

23,7 — 13,8 — 10,6 — 11,2 — 13,5 — 15,7 — 25,6.

D'où l'on voit que les densités croissent pour décroître ensuite et que l'inverse se produit pour les volumes atomiques.

Cette digression, forcément abrégée, nous sera très utile pour comprendre ce qui va suivre.

III. — *M. Osmond confirme pour le fer la loi de Roberts-Austen.*

Reprenant et complétant ses anciennes expériences sur les formes allotropiques du fer, M. *Osmond* trouve que les nouveaux résultats obtenus confirment pleinement la loi de *Roberts-Austen*.

Ecrivons dans deux colonnes I et II, selon l'ordre des volumes atomiques croissants, le nom des éléments dont on a étudié l'action sur le fer.

La colonne I comprendra les corps dont le volume atomique est inférieur à celui du fer (7,2) ; la colonne II, ceux dont le volume atomique est supérieur à celui du fer.

I	VOLUMES ATOMIQUES	II	VOLUMES ATOMIQUES
Hydrogène . .	1	Chrome . . .	7.7
Carbone . . .	3.6	Tungstène . .	9.6
Bore	4.1	Aluminium . .	10.9
Nickel . . .	6.7	Molybdène . .	11.1
Manganèse . .	6.9	Silicium . . .	11.2
Cuivre . . .	7.1	Arsenic . . .	13.2
		Phosphore . .	13.5
		Soufre . . .	15.7

L'expérience prouve que les corps de la colonne I dont le volume atomique est inférieur à celui du fer retardent pendant le refroidissement, toutes choses égales d'ailleurs, la transformation du fer β en fer α et celle du carbone de trempe en carbone de recuit. Pour ces deux raisons, ils tendent à augmenter, à vitesse égale de refroidissement, la proportion de fer β subsistant dans le fer ou l'acier refroidis et, par suite, la dureté du métal. Leur action est équivalente à celle d'une trempe plus ou moins vive : ils donnent ce qu'on pourrait appeler une *trempe chimique*.

Au contraire, les corps inscrits dans la colonne II et dont le volume atomique est supérieur à celui du fer tendent à relever, pendant le refroidissement, la transformation du fer vers la position normale qu'elle occupe dans le fer pur (855°); ils hâtent la combinaison du fer et du carbone. Pendant le réchauffage, ils entravent la transformation du fer α en fer β. Leur action est donc équivalente à celle *d'un recuit ou d'un revenu*.

Aux corps de la colonne I, dit M. *Osmond*, on pourrait ajouter l'hydrogène dont le volume atomique est très petit et qui rend le fer électrolytique dur et cassant. Peut-être, ajoute ce savant expérimentateur, vaudrait-il mieux dire, avec *Graham*, *l'hydrogenium* plutôt que l'hydrogène, car l'hydrogène gazeux ne paraît pas exercer une action bien marquée.

En dehors de ces modifications résultant d'une loi générale, les corps étrangers peuvent exercer une *influence individuelle* (1) sur la résistance, la dureté, etc... des aciers dans lesquels ils ont été incorporés, soit par leur action propre, soit par celle des composés qu'ils peuvent former avec un ou plusieurs des autres éléments existant dans le métal : c'est ce qu'on observe pour le *tungstène*, le *chrome*, etc... Il convient aussi d'ajouter que ces mêmes corps peuvent manifester leur influence par des modifications, plus ou moins accentuées, rapportées à la structure.

Si plusieurs corps étrangers se trouvent à la fois dans l'acier, comme c'est le cas ordinaire, ils peuvent renforcer ou entraver leurs actions réciproques suivant leur position respective dans la classification que

(1) Certains corps incorporés à l'acier peuvent augmenter sa dureté et sa résistance aux différents efforts parce qu'ils jouent le rôle d'*éléments durcissants* tenu par le fer β dans les aciers au carbone et non parce qu'ils augmentent la proportion de fer β.

nous avons indiquée. C'est ainsi, par exemple, que la présence du soufre neutralise en partie celle du manganèse.

Enfin, il importe de signaler que les changements observés dans les propriétés magnétiques des aciers contenant des corps étrangers viennent corroborer les conclusions résultant de la loi de *Roberts-Austen*. Nous insisterons en temps utile sur ce point spécial.

C'est en étudiant l'action propre des principaux corps entrant aujourd'hui dans la composition des aciers, soit qu'ils proviennent des matières premières employées dans leur élaboration, soit qu'ils aient été introduits à dessein, que nous compléterons l'exposé des théories actuelles.

Nous pourrons ainsi donner au lecteur un aperçu moins abstrait et lui faire entrevoir la possibilité d'établir, *dans un avenir probablement peu éloigné, une théorie générale des aciers*. En tous cas, l'esquisse forcément imparfaite que nous allons tracer aura, au moins, l'avantage de rassembler les principaux résultats scientifiques acquis à ce jour à l'art sidérurgique.

Article 1er. — Aciers au carbone

Par aciers au carbone nous entendons ceux dans lesquels le carbone y est l'élément principalement actif, les autres corps étrangers n'y étant qu'à l'état de traces ou en proportions telles qu'ils ne modifient que dans une mesure assez restreinte l'influence prépondérante du carbone. Ce sont les aciers les plus répandus, les seuls d'un usage courant avant ces vingt dernières années.

I. — *Données pratiques.*

Les expériences les plus remarquables ayant pour but d'étudier les rapports existant entre la composition chimique et les propriétés mécaniques des aciers ont été faites, à l'occasion de l'Exposition de 1878, par le professeur *Bauschinger*, de *Munich*, sur les aciers de *Reschitza* (Hongrie), par le *Jernkontoret* (Comptoir des forges de Suède) et enfin par la compagnie de *Terrenoire* qui confia à M. *Deshayes*, l'un de ses Ingénieurs les plus distingués, la direction de ces travaux.

Les résultats des recherches de M. *Deshayes* firent l'objet d'un mémoire fort documenté, publié par les Annales des mines, en 1879.

Ne considérons tout d'abord que les aciers *simplement carburés*.

Les aciers soumis aux épreuves ont été essayés, soit à l'état recuit, soit à l'état trempé à l'huile ou à l'eau.

A. — *Essai de traction.* — Examinons le cas d'un *métal simplement recuit.*

1° — *Cas du métal recuit.* — Si C est la teneur en carbone d'un acier au carbone tel que nous l'avons défini au début du présent article, on pourra pratiquement faire usage des *formules empiriques* suivantes, établies à la suite d'un très grand nombre d'expériences :

$$(1)\quad \begin{cases} R = 30 + 18\,C + 36\,C^2 \\ A\,0\,0 = 42 - 36\,C \text{ (sur barreau de 100 mm.)} \\ A\,0\,0 = 31 - 27\,C \text{ (sur barreau de 200 mm.)} \end{cases}$$

Sans anticiper sur l'étude de l'influence des autres corps étrangers sur les propriétés mécaniques des aciers, nous devons ajouter qu'aux formules (1) on substitue, en général, les suivantes :

$$(2)\quad \begin{cases} R = 30 + 18\,C + 36\,C^2 + 18\,Mn + 10\,Si + 15\,Ph \\ A\,0\,0 = 42 - 36\,C - 5{,}5\,Mn - 6\,Si \text{ (sur barreau de 100 mm.)} \\ A\,0\,0 = 31 - 27\,C - 4{,}1\,Mn - 4{,}5\,Si \text{ (sur barreau de 200 mm.)} \end{cases}$$

Mn, *Si* et *Ph* étant des teneurs en manganèse, silicium et phosphore relativement faibles.

Les limites que ne devront pas dépasser *Mn*, *Si* et *Ph* pour que l'acier en expérience puisse être néanmoins appelé *acier au carbone* seront définies ultérieurement, au moins pour *Mn* et *Si*. Pour le phosphore, hâtons-nous d'ajouter qu'il en faudra toujours la plus petite quantité possible dans le métal.

On voit donc qu'avec un métal recuit, R augmente avec la teneur en carbone, et, qu'en même temps, A 0 0 diminue.

Ce double fait est universellement admis.

Les formules (1) ou (2), dues à M. *Deshayes*, sont applicables depuis le fer doux fondu homogène jusqu'aux aciers contenant 0,900 à 1 0 0 de carbone, mais pas au-dessus (1).

(1) M. *Osmond* a aussi proposé pour les aciers au carbone simplement recuits les deux formules suivantes :

Acier Bessemer — $R = 26 + 60\,C + 23\,Mn + 11\,Si + 65\,Ph$ (métaux demi-durs et durs de 55 à 90 kilos. Nuance : rails).

Lorsqu'on étudie des aciers à plus de 1 0/0 de carbone, on observe que R croît très rapidement jusqu'à 100 kg. par mm² de section, tandis que A descend à 1 0/0.

Pour un acier à 1,25 0/0 de carbone, R commence à décroître : à 1,5 0/0 de carbone on passe aux métaux mixtes entre l'acier et la fonte, R continue à décroître d'une *façon à peu près continue* jusqu'à ce que l'on arrive à la fonte noire.

Pour les aciers recuits et simplement carburés dont il est actuellement question et pour ceux-là seulement, soit pour les *aciers au carbone*, E est très voisin de $\frac{R}{2}$.

Quant à la striction, elle diminue plus rapidement que A 0/0, quand la teneur en carbone augmente.

2° — *Explication des résultats précédents par la théorie cellulaire.* — La théorie cellulaire donne dans une certaine mesure l'explication des résultats précédents.

Lorsqu'un barreau d'acier recuit est soumis à la traction, l'effort est supporté à la fois, à l'origine, par les noyaux de fer des cellules simples et par leurs enveloppes. Ces enveloppes de carbure de fer ou ciment sont plus dures, moins plastiques que les noyaux.

Quand le barreau s'allonge, les enveloppes dures et rigides arrivent bientôt à leur déformation limite, se brisent une à une, car le ciment n'est jamais réparti d'une façon absolument uniforme, et laissent les noyaux seuls supporter l'effort de traction : quelques noyaux qui n'ont pas d'enveloppe sur une ou plusieurs faces peuvent se déformer encore plus rapidement. De là ces déchirures parfois visibles à la surface des barreaux d'épreuve et les petits crépitements répétés, qu'on entend pendant l'essai, dus sans doute à la rupture des enveloppes. C'est ce moment correspondant à la rupture définitive des enveloppes qui marque la fin de la période dite élastique.

Un acier recuit ayant travaillé jusqu'à sa limite élastique a déjà subi un commencement de désagrégation.

Dans un acier doux, la proportion du ciment est relativement faible,

Acier Martin — $R = 26 + 46{,}5\,C + 21\,Mn + 11\,Si + 65\,Ph$ (depuis les tôles extra-douces jusqu'au métal à canon).

MM. *Webster* et le baron *Juptner* ont établi des tableaux des valeurs de R selon les diverses teneurs des aciers en éléments étrangers ou proposé de nouvelles formules empiriques. Il nous paraît inutile d'en donner le détail, les formules de MM. *Osmond* et *Deshayes* suffisant amplement aux besoins de la pratique.

la rupture des enveloppes se produit pour une charge très légèrement supérieure à la limite élastique des noyaux et fort éloignée de leur résistance à la rupture.

Ces noyaux ont donc une marge assez grande pour s'allonger, il se produit dans la section la plus faible une striction bien accusée avant la rupture du barreau, car les allongements se font sans changement sensible du volume. La charge de rupture moyenne des enveloppes dégage la plus grande partie des noyaux, la résistance du barreau diminue tout à coup quand ces noyaux sont mis à nu et privés de leurs soutiens. C'est là l'explication de l'abaissement brusque de la colonne manométrique qui fait équilibre à la résistance du barreau à l'instant qui correspond à la limite élastique.

Pour les aciers durs recuits la proportion du ciment est plus forte, les enveloppes résistent à une charge voisine de celle qui amène la rupture des noyaux. Ces derniers, maintenus dans leur enveloppe peu déformable, ne peuvent s'allonger aisément et la rupture a lieu presque sans striction. L'allongement moyen est beaucoup plus faible que dans les aciers doux.

3° — *Cas du métal trempé, comprimé ou écroui.* — Nous ne reviendrons pas sur ce qui a été dit à propos des modifications que subissent E, R et A 0 0 lorsqu'on soumet aux *diverses trempes* les aciers au carbone.

Rappelons seulement qu'avec les trempes positives on augmente E, R et $\frac{E}{R}$, le rapport $\frac{E}{R}$ pour les aciers au carbone valant environ $\frac{1}{1,5}$ lorsqu'on les trempe à l'huile.

Avec les trempes négatives, R est à peu près conservé, mais A 0 0 est augmenté.

Dans le cas des trempes positives au rouge cerise clair (à l'huile ou à l'eau à 70°), on adopte souvent la formule empirique suivante :

$$Rt = Rr + 0,92\,(Rr - 32)$$

dans laquelle R*t* désigne la charge de rupture après trempe et R*r* celle du métal simplement recuit donnée par les formules *Deshayes* ou *Osmond*. On remarquera que pour R*r* = 32, R*t* = R*r*, ce qui traduit l'invariabilité des caractéristiques du fer doux (32 kilos pour R*r*) lorsqu'on le trempe.

La *compression* de l'acier liquide n'augmente pas d'une manière sen-

sible R et E, mais elle paraît exercer une heureuse influence sur A 0/0 qu'elle augmenterait de 40 0/0 environ pour des barreaux pris dans le sens de la longueur du lingot et bien davantage, pour des barreaux pris dans le sens tranversal.

Examinons enfin l'effet produit sur les caractéristiques de l'essai de traction lorsqu'on soumet un barreau d'acier recuit à un *effort supérieur à* E.

Ce barreau d'acier se déforme et prend un allongement total M*m* qui peut se décomposer en deux parties :

1°) *Un allongement élastique* égal à E*e*;

2°) *Un allongement permanent* Mm_1, égal à la différence entre l'allongement total M*m* et l'allongement élastique m_1m = E*e*.

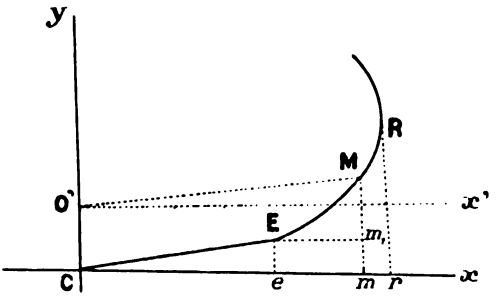


Fig. 236.

Si l'on vient à supprimer complètement l'effort au moment où il a pris cette valeur O*m*, puis qu'on soumette le même barreau à la traction, on observe que E a changé et est devenu précisément égal à O*m*.

R a la même valeur que si le barreau avait été étiré en une seule fois et la courbe de traction du barreau modifié peut être représentée par O'MR rapportée aux axes *x'o'y*, la distance OO' valant Mm_1.

Dès que l'acier a dépassé sa limite élastique, le fer des noyaux des cellules simples prend, en s'allongeant, un *écrouissage* qui change ses propriétés, il devient plus dur et son élasticité est augmentée en raison de l'effort auquel il a résisté.

4° — *Conséquences au point de vue de l'emploi des aciers dans les constructions.* — Une fois en possession de ces données expérimentales concernant les aciers au carbone et variant selon les divers traitements qu'ils ont subis, on a pu tirer un certain nombre de conséquences pratiques au point de vue de l'utilisation de ces aciers dans les constructions.

Si l'on construit une courbe de traction ayant pour abcisses les efforts exprimés en kilogr. par mm² de section primitive du barreau et pour ordonnées les allongements pour cent correspondants, le travail

résistant du barreau entre deux positions infiniment voisines de celui-ci sera $r.dA$, et si l'on compte depuis l'origine de la traction jusqu'au moment où le barreau est rompu, ce travail résistant est $\int_0^A r.dA$.

Il peut être représenté graphiquement par l'aire OEMNA couverte de hachures de la courbe de traction (fig. 237).

C'est ce que *Poncelet* a appelé : *la Résistance vive de rupture Tr.*

La surface du triangle OE*a* représente : la *Résistance vive élastique Te.*

Il est intéressant dans la pratique de considérer la résistance vive de

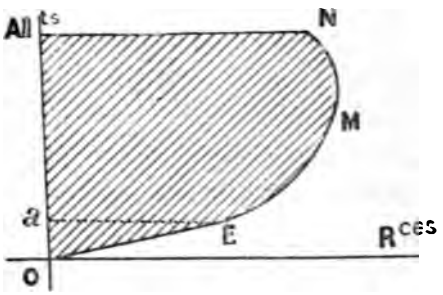


Fig. 237.

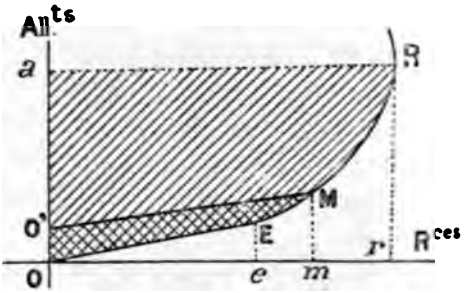


Fig. 238.

rupture du barreau, disponible pour l'effort maximum R qu'il peut supporter sans se rompre. C'est l'aire OER*a* de la figure 238. Or, nous savons que si le barreau a subi un effort de traction O*m* supérieur à sa limite élastique O*e*, la nouvelle courbe de traction sera OM*Ra*. On voit donc que le nouveau T*r* est plus petit que le précédent, il est diminué d'une quantité représentée par l'aire OEMO'.

L'écrouissage augmente donc T*e*, mais diminue T*r*.

C'est surtout pour les pièces qui peuvent être accidentellement soumises à des chocs qu'il est important de ne pas produire d'allongements permanents. Une pièce qui aurait, en effet, subi un effort de traction voisin de R aurait acquis un E très grand sans que R soit changé; mais T*r* ayant été très fortement réduit, cette pièce se briserait facilement sous l'action d'un choc qu'elle aurait pu supporter sans danger si le métal n'avait été écroui.

Quand une pièce est soumise à des efforts fréquemment répétés on admet encore aujourd'hui, faute de mieux, les conclusions que *Wœhler* et *Spangenberg* ont tiré de leurs expériences, à savoir :

La pièce arrive à se briser quand ces efforts dépassent une certaine limite notablement inférieure à R. Cette limite dangereuse est égale à E, quand l'effort répété varie entre 0 et un maximum toujours le même.

Elle est égale à E/2 quand l'effort change à chaque fois de sens et varie entre une tension et une compression égales en valeur absolue.

Les courbes de traction ne sauraient être construites pour les divers aciers que par l'expérience, car on ne connaît pas analytiquement la relation liant les efforts aux allongements. Elles seront fort différentes selon la composition chimique des aciers ainsi qu'il résultera de l'étude des caractéristiques de ceux dans lesquels le carbone n'est pas l'élément actif prépondérant. L'effet de l'écrouissage sera étudié aussi quand il y aura lieu ; nous aurons ainsi tous les éléments nécessaires au constructeur pour pouvoir les établir.

B. — *Valeur des autres essais par rapport à celui de traction.* — Nous avons dit antérieurement que pour apprécier la qualité d'un acier, le mieux était de faire, avec des essais à la traction, des épreuves de choc et de flexion ou de pliage. Il est cependant particulièrement utile d'indiquer les rapports existant entre ces divers essais pour *les aciers au carbone.*

Rappelons la loi générale s'appliquant pour la traction à ce que nous pourrions appeler *l'acier type*, soit *l'acier principalement carburé :* « *Si* « *E est faible, R sera faible ; la valeur de la striction étant variable* « *mais fonction de la pureté du métal : si E et R croissent,* A 0 0 *et* « *la striction diminuent.* »

Cela posé, soit un acier ayant une faible valeur pour E et pour R ; essayé à la flexion il donnera une faible valeur pour la *limite élastique de flexion* E*f* et une forte charge à la *rupture par flexion*, de sorte que la charge de rupture par flexion R*f* semble devenir très élevée ; mais, en réalité, cela tient à ce que l'on arrive à un pliage considérable avant d'atteindre la rupture.

Si l'on considère un acier dur ayant des valeurs plus fortes pour E et R, il présentera à la flexion une très forte valeur de E*f*, une très faible flèche, et la valeur de R*f* suivra de très près la valeur de E*f* dans le cas où la valeur de la striction dans l'essai à la traction est faible. Dans le cas, au contraire, où la striction est forte, la valeur de R*f* s'éloigne de E*f* et devient quelquefois très grande.

Si l'on examine les *essais au choc*, un métal doux à la traction sera

TABLEAU RÉCAPITULATIF des épreuves à

CLASSE	NUANCE DES ACIERS	ESSAIS A LA TRACTION — BARRETTES NON TREMPÉES — Aciers en barres Pièces en acier — Résistance à la rupture par mil. carré.	Allongement moyen °/.	Minimum de l'allongement dans les épreuves individuelles	Tôles d'acier. — Aciers profilés. — De 10 à 30 mil. d'épaisseur — Résistance à la rupture par mil. carré	Allongement moyen °/.	Minimum de l'allongement dans les épreuves individuelles	De 3 à 10 mil. d'épaisseur — Résistance à la rupture par mil. carré	Allongement moyen °/.	Minimum de l'allongement dans les épreuves individuelles	Barrettes trempées — Aciers en barres, Tôles d'acier, Aciers profilés — Augmentation de résistance à la rupture — Maximum	Minimum
1re	Aciers extra-doux (fer fondu, fer homogène, etc.).	34k à 40k	29	26	34k à 40k	25	22	35k à 43k	23	20	10k	»
2e	Aciers doux. . . .	40k à 48k	25	22	40k à 48k	23	19	42k à 50k	21	17	15k	»
3e	Aciers demi-doux.	46k à 54k	22	20	46k à 54k	20	17	48k à 58k	18	15	25k	»
4e	Aciers demi-durs .	55k à 65k	18	15	55k à 65k	16	13	58k à 68k	15	12	»	25k
5e	Aciers durs	65k à 75k	12	8	»	»	»	»	»	»	»	35k
6e	Aciers extra-durs .	plus de 75k	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Nota. — Pour la fonte, il faut compter en moyenne : R=15k; E=4k; A°/₀=4.

subir aux aciers (*Service des forges. — Art*[ie]).

ESSAIS DE PLIAGE	ESSAIS AU CHOC	EMPLOIS PRINCIPAUX
a bloc	Les barreaux trempés doivent supporter sans se rompre 15 coups de mouton.	Pièces de forge. — Emboutis. — Rivets. — Eclisses. Métal soudable et ne trempant que très légèrement. L'acier extra-doux peut remplacer le fer au bois et le fer puddlé de 1re qualité dans presque toutes leurs applications. La tôle d'acier extra-doux peut etre substituée avantageusement à la tôle au bois.
ɔc au-dessous de ıil. d'épaisseur un rayon égal a sseur à partir de ıil. d'épaisseur ɛt au-dessus.	id.	Pièces de forge. — Bandages de roues. Profilés et tôles pour les constructions de l'Artillerie ; flasques, entretoises, etc.
»	id.	Anciens essieux de l'artillerie. — Vis de pointage. Tiges de piston pour marteau pilon. — Pièces de forge exigeant une grande résistance. Petits rails, traverses, etc.
»	id.	Anciens essieux de l'artillerie et des équipages militaires. Pièces exigeant une grande dureté et une grande résistance, glissières, tiges de piston, arbres de transmission, etc. Ressorts doux.
»	Les barreaux non trempés doivent supporter sans se rompre 15 coups de mouton.	Pièces exigeant une très grande dureté, glissières, etc. Ressorts. Marteaux.
»	»	Outils.

dont également au choc, à la condition *toutefois d'avoir une forte striction*, c'est-à-dire que les aciers relativement durs à 0,600 ou 0,700 de carbone résistent parfaitement aux chocs. La striction qui donne la mesure de la valeur locale de la déformation du métal avant la rupture dépend, comme nous l'avons dit, de la pureté du métal, c'est-à-dire de la proportion plus ou moins forte de corps étrangers accompagnant inévitablement le carbone dans tous les aciers, même lorsqu'on les appelle « *simplement carburés* ».

Les aciers durs à la traction résistent également bien à *la compression* et très bien surtout au cisaillement par pression lente et non par choc.

A la torsion, les aciers se classent de même et il a été constaté que les aciers doux pouvaient subir sans rupture une torsion de près de deux circonférences.

« *L'essai à la traction peut donc, dans une certaine mesure, être* « *considéré comme le criterium de la valeur pratique des aciers et* « *c'est ce qui fait choisir par tous les services ou administrations les* « *résultats fournis par ce genre d'essai comme base d'une classification* « *rationnelle.* »

II. — *Constituants primaires des aciers au carbone.*

A. — *Définition et historique de la métallographie microscopique.* — L'étude des constituants primaires des aciers au carbone résulte du développement d'une science nouvelle, *la métallographie microscopique*. Voici comment M. *Osmond* la définit.

Cette science, d'abord descriptive, doit permettre de déterminer dans les métaux à leurs différents états la nature, la forme, les dimensions, les proportions, la distribution locale et la répartition générale des divers constituants. Plus tard, une fois en possession de données expérimentales suffisantes, elle devra rattacher les faits observés :

1° — *A leurs causes*, en recherchant comment un métal change de structure sous l'influence de ces trois facteurs combinés : la température, le temps et la pression.

2° — *A leurs conséquences*, en définissant les propriétés mécaniques qui correspondent à une structure déterminée.

Par cette double étude les consommateurs apprendront quelle struc-

ture ils doivent exiger d'un métal pour répondre à des besoins connus, les producteurs quels procédés ils doivent employer pour l'obtenir. La métallographie deviendra le lien nécessaire entre la fabrication des métaux et leur emploi.

La métallographie microscopique paraît avoir eu plusieurs centres indépendants de création.

Les publications du Dr *Sorby*, de *Sheffield*, remontent à 1864 et celles du professeur *Martens*, de *Berlin*, à 1878. Tandis que le Dr *Sorby* s'était borné à créer une technique complète pour l'examen des coupes de corps opaques sous de forts grossissements et étudiait à cet effet les divers métaux dérivés du fer, le professeur *Martens* analysait de préférence et concurremment avec les coupes, les lois générales de la rupture, les cassures, les soufflures et les cristallisations des métaux.

En 1880, M. *Osmond* commençait avec M. *Werth* ses remarquables travaux sur la structure cellulaire de l'acier ; nous avons vu combien avait été fécond l'emploi du microscope entre les mains de ces savants expérimentateurs.

Puis ces recherches microscopiques étaient perfectionnées sous l'impulsion du Dr *Sorby* et plus tard l'*Allemagne* leur donnait la consécration officielle en créant sous la direction du professeur *Martens* l'Institut technique de *Charlottenbourg*, dont l'installation remarquable permet non seulement les travaux isolés de quelques chercheurs, mais offre encore aux industriels le moyen de faire contrôler leurs produits.

Récemment M. U. *Le Verrier*, Ingénieur en chef des mines, a muni son laboratoire du Conservatoire des arts et métiers des appareils nécessaires aux études micrographiques.

B. — *Mode opératoire de l'analyse micrographique.* — On ne peut étudier une cassure avec un fort grossissement ; quand on veut examiner un échantillon donné, il faut en obtenir une coupe plane que l'on polit.

Pour opérer le polissage, il faut d'abord *dégrossir* la plaque à la lime ou à la meule ; on continue en se servant de papiers émeris de plus en plus fins en ayant soin de croiser les rayures et on achève avec du rouge *d'Angleterre dit à l'or* ou du rouge à l'oxalate. On imprègne de ce rouge un morceau de drap à poil ras fixé sur le plateau d'une machine à polir horizontale : on humecte et on donne de 1000 à 2000 tours de manivelle en ajoutant de temps en temps un peu d'eau et en appuyant très

peu à la fin. Il reste toujours des petites stries qui ne gênent pas, à la condition qu'elles soient rares.

La méthode générale comprend trois opérations successives qui sont :

1°) — *Le polissage en bas relief* reposant sur l'inégale dureté des constituants de l'acier.

On saupoudre de rouge un parchemin humide tendu sur une planche bien plane en bois dur : on le porte sous un robinet d'eau et on brosse pour éliminer tout le rouge qui n'a pas pénétré dans les pores de la peau. Sur ce parchemin rougi on frotte la surface métallique en ajoutant de temps en temps quelques gouttes d'eau : il est quelquefois utile de terminer le polissage avec du sulfate de chaux précipité.

Les constituants les plus durs apparaissent en relief et on distingue les reliefs des creux en plaçant l'objectif du microscope un peu au-dessous du point et en le relevant lentement.

2°) — *Le polissage-attaque* consiste à ajouter à l'action mécanique de la poudre à polir celle d'un réactif liquide dont l'activité est exaltée par le frottement.

Le réactif employé par M. *Osmond* est l'infusion de racine de réglisse qui, associée au sulfate de chaux, colore certains constituants à l'exclusion des autres ou avant eux.

3°) — *L'attaque* se pratique sur la coupe repassée au rouge pour enlever toute trace des deux opérations précédentes.

M. *Osmond* emploie à cet effet la teinture d'iode qu'il applique par touches successives à raison d'une goutte par cm^2. Après l'attaque on lave à l'alcool et on sèche avec un linge fin ou mieux avec un jet d'air.

Au microscope on adjoint, pour l'éclairage oblique, le miroir parabolique de *Sorby* et le miroir de *Lieberkünh* qui se fixent l'un et l'autre sur l'objectif ; pour l'éclairage normal, on a recours au prisme à réflexion totale de *Nachet*.

Pour photographier les indications du microscope M. *Osmond* se sert de la petite chambre noire verticale de *Nachet*, éclairée à l'aide d'une lampe à huile de colza : dans ces conditions, une pose de 40 minutes est suffisante.

C. — *Nature des constituants des aciers au carbone.* — M. *Osmond* appelle *constituant primaire* tout élément de structure que des réactions micrographiques permettent de considérer comme une espèce.

Ces constituants, sans compter la scorie, sont *actuellement* au nombre

de cinq principaux; les progrès de la science modifieront vraisemblablement plus tard cette classification qui vient compléter si heureusement, à l'aide de données plus précises, l'aperçu esquissé à grands traits par la théorie cellulaire primitive.

1° — *Ferrite* (M. *Howe*). — C'est le premier élément constituant des fers carburés; c'est du fer pur ou du moins pratiquement pur offrant l'aspect de cristaux ou grains enchevêtrés plus ou moins parfaits changeant de forme par le travail à chaud. Par l'attaque à l'acide on a une indication très nette des joints des grains entre eux. La ferrite est du fer α.

2° — *Cémentite* (M. *Howe*). — C'est le carbure de formule probable Fe^3C, car on n'a jamais réussi en fait à l'isoler certainement pur et intact. Le carbone qui s'y trouve engagé en composition définie est le *carbone de recuit* de la théorie cellulaire. On l'a appelé *cémentite* car c'est dans les aciers cémentés que ce carbure se trouve rassemblé en éléments de plus grande taille, formant à la fois des groupes isolés, des lamelles rectilignes juxtaposées, des groupes analogues reliés en réseau grossièrement polygonal et des lamelles simples, le plus souvent curvilignes, interstratifiées avec la ferrite.

La propriété caractéristique de la cémentite est sa dureté, au sens minéralogique du mot.

3° — *Sorbite* (M. *Sorby*). — M. *Sorby* a décrit sous le nom de *perlite* un composé binaire formé de très fines lamelles, le plus souvent courbes alternativement dures et douces, qui prend en éclairage oblique les couleurs irisées de la nacre pourvu que les lamelles douces aient été suffisamment creusées.

On a admis que les lamelles douces étaient de la *ferrite* et les dures de la *cémentite;* puis, le contrôle expérimental (1) a démontré qu'on était en présence d'un nouveau constituant primaire que M. *Osmond* a appelé *sorbite* en l'honneur du premier pionnier de la métallographie.

D'après M. *Osmond*, la *perlite* serait formée de lamelles alternantes de *sorbite* et de *ferrite*, peut-être même de *cémentite* et de *ferrite mais avec interposition de sorbite*.

La composition de la *sorbite* est encore problématique, mais les réactions micrographiques indiquent que la *sorbite* contient certainement

(1) La différence de dureté notamment des diverses lamelles est loin d'égaler celle qui existe entre la *ferrite* et la *cémentite*

L'épaisseur d'une paire de lamelles ne dépasse probablement pas 1/1000 de mm. en moyenne.

du carbone. Maintenant si on réfléchit que le carbone des aciers n'est jamais intégralement engagé dans la *cémentite*, on est amené à penser que le carbone de la *sorbite* appartient à la variété appelée *carbone de trempe*.

La sorbite constituerait une zone de transition entre la *cémentite* et la *ferrite* dans les aciers simplement refroidis, entre la *cémentite* et la *martensite* dans les aciers au-dessus de a_1.

Son étude se relierait à celle des transformations de la *cémentite* qui sont elles-mêmes insuffisamment connues.

4° — *Martensite* (M. *Osmond*). — Le 4e constituant est celui qu'on obtient couramment par la trempe ; il n'est donc pas nouveau, mais on n'en connaissait pas la structure.

Comme on voyait le grain des cassures diminuer par la trempe jusqu'à disparaître entièrement à l'œil dans les aciers les plus carburés, on était assez porté à croire que la structure des aciers trempés tendait vers *l'amorphisme*. Elle est cependant très franchement cristalline.

L'attaque à l'aide de certains réactifs montre que la structure est formée de trois systèmes d'aiguilles parallèles aux trois côtés d'un triangle, se recoupant fréquemment dans la même région et caractérisant les *cristallites* du système cubique. Par le polissage dit en *bas relief*, la structure n'apparaît que vaguement, ce qui prouve que la dureté de la masse est à peu près uniforme.

Ce sont ces groupes d'aiguilles ou de fibres, séparées ou non par un remplissage grenu ou vermiculé qui constituent la *martensite*. Celle-ci conserve ses formes, quelle que soit la dureté de l'acier trempé ; mais les aiguilles sont d'autant plus longues que le métal est moins carburé.

La martensite n'est certainement pas une combinaison définie liquatée du fer avec le carbone : elle représente l'organisation cristallitique, sous l'influence du carbone, de l'une des variétés allotropiques du fer.

5° — *Troostite* (M. *Osmond*). — Ce cinquième constituant, celui qui appartient le plus complètement à M. *Osmond*, a été appelé par lui *troostite* en l'honneur d'un de nos chimistes les plus éminents, M. *Troost*, qui a rendu à la métallurgie des services signalés.

La troostite se trouve avec ses caractères les plus nets dans les aciers mi-durs trempés pendant le cours des transformations du fer. C'est une forme de transition entre le fer doux et l'acier trempé : sa constitution chimique exacte est à déterminer comme celle de la *sorbite*.

Elle apparaît par le *polissage en bas relief* comme un liseré de lar-

geur variable et de dureté intermédiaire entre les noyaux en relief (*martensite*) et les lambeaux en creux (*ferrite*).

D. — *Genèse de la formation des constituants.* — Une digression est ici nécessaire; reportons-nous à quelques résultats récemment acquis à la suite des recherches scientifiques concernant les alliages.

1° — *Digression sur les alliages eutectiques.* — Définissons d'abord la *courbe de fusibilité* d'un alliage et prenons, pour plus de simplicité, le cas d'un alliage binaire dans lequel nous ferons varier les proportions des deux métaux constituants.

Considérons les alliages de l'argent avec le cuivre.

Si l'on prend pour abscisses les pourcentages en poids de l'un des métaux et pour ordonnées les températures auxquelles se produisent, pour chaque composition, des dégagements de chaleur pendant le cours du refroidissement à partir de l'état liquide, on obtient, en reliant les points correspondants, des courbes dites de *fusibilité*.

Le cas simple des alliages *argent-cuivre* nous sera fort utile pour établir nos définitions préliminaires.

Suivant la composition de l'alliage, le métal en excès commence à se

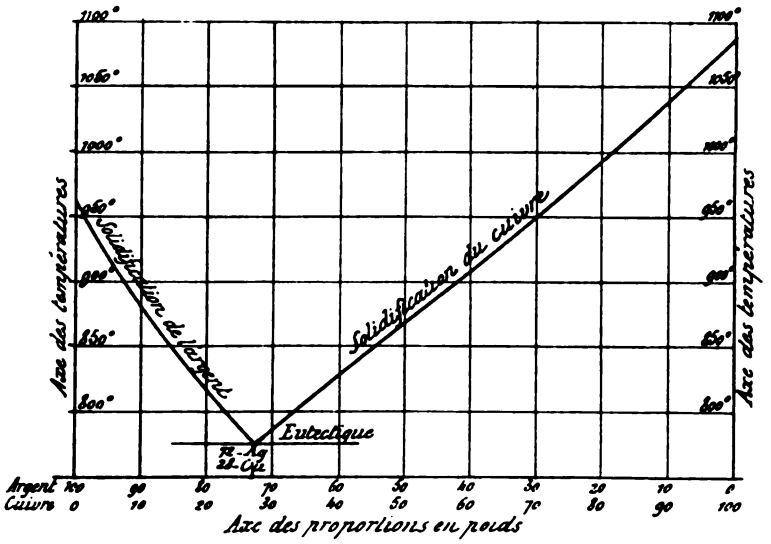


Fig. 239.

séparer de la dissolution à une température déterminée et continue à se précipiter jusqu'à ce que la partie restée liquide contienne 72 d'ar-

gent contre 28 de cuivre. Dès lors, l'argent est saturé de cuivre, le cuivre est saturé d'argent et les deux métaux se solidifient simultanément à température constante sous forme d'un mélange mécanique.

L'alliage 72-*Ag* et 28-*Cu* à point de fusion minimum a reçu le nom *d'eutectique* (Prof. *Guthrie*).

En d'autres termes, dans chacun des alliages de la série, selon que la teneur en argent est supérieure ou inférieure à 72, il se dépose tout d'abord, soit des cristallites d'argent, soit des cristallites de cuivre qui grossissent jusqu'à ce que la partie fluide ait atteint la composition de l'eutectique à 72 d'argent et 28 de cuivre. L'eutectique se solidifie alors à température constante en englobant les cristallites.

Les mélanges eutectiques sont *hétérogènes*, leur solidification maintenant dans un contact intime les métaux composants.

Il n'y a pas toujours qu'un seul eutectique comme dans le cas de l'alliage cuivre-argent que nous avons choisi. En général, les alliages se composent à l'état liquide de plusieurs solutions dont chacune abandonne, en se refroidissant, une liqueur mère. D'autre part, ces liqueurs mères n's'combinent pas entre elles le plus souvent, de sorte qu'il se produit un état très complexe quand la température est devenue assez basse pour que la masse entière se solidifie. Chacune de ces liqueurs mères métalliques est un alliage eutectique ; il s'en présente donc ordinairement plusieurs par série.

2° — *Courbes de fusibilité des aciers.* — De l'étude des courbes de fusibilité des aciers au carbone découlera la genèse de la formation des constituants.

Ces courbes de fusibilité sont aussi des courbes de transformation, car, pendant le refroidissement, le fer de l'acier se transforme en parcourant plus ou moins complètement, comme on le sait, l'échelle des variations allotropiques.

Nous résumerons, aussi brièvement que possible, le phénomène de solidification des aciers qu'analyse magistralement M. *Osmond* dans son mémoire sur la *Métallographie considérée comme méthode d'essai.*

Prenons pour abscisses les teneurs en carbone de 0 à 1,60 0 0 et pour ordonnées les températures. Pour chaque teneur en carbone, portons sur l'ordonnée correspondante les températures auxquelles commencent les différents dégagements de chaleur.

On voit que l'ensemble du diagramme rappelle exactement le diagramme de fusibilité des alliages *Ag-Cu*. La branche BE correspond,

ainsi qu'il résulte des expériences micrographiques, à une séparation de fer pratiquement pur (*ferrite*); la branche EC à une séparation de

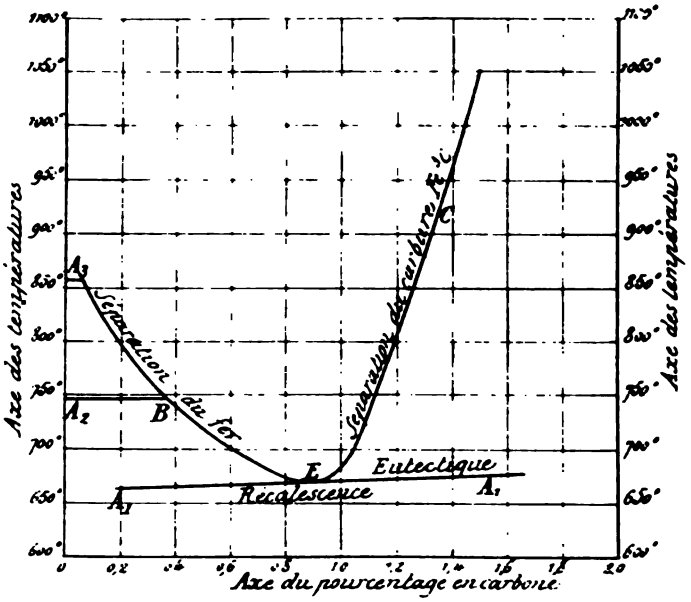


Fig. 240.

carbure Fe^3C (*cémentite*) et la branche à peu près horizontale à la séparation simultanée des deux constituants en lamelles alternantes (*perlite*) (1).

Nous faisons abstraction, bien entendu, de la présence d'une certaine quantité de *sorbite* qui, d'après des expériences déjà citées, serait toujours incorporée au mélange de ferrite et de cémentite pour constituer la perlite.

Ainsi, conclut M. *Osmond*, « l'acier au-dessus de BEC, c'est-à-dire « aux températures élevées, est une solution homogène du carbure « Fe^3C dans une forme allotropique du fer : pendant le refroidissement « lent, cette solution laisse déposer, soit du fer, soit du carbure, quand « elle est saturée de l'un ou de l'autre; et elle atteint ainsi une com- « position déterminée, toujours la même, quel que soit le point de dé- « part, *la composition de l'eutectique.* »

(1) Les branches A_2B et A_3B, se confondant en une seule branche BE à partir du point B, correspondent aux transformations allotropiques du fer, à partir des points A_2 et A_3 dont nous connaissons la définition.

C'est à une teneur voisine de 0,89 0/0 que les aciers sont presque entièrement constitués de perlite. Les aciers à moins de 0,89 0/0 de carbone sont formés de perlite et de cémentite.

L'étude de la structure par les procédés micrographiques confirme la théorie de la trempe telle que nous l'avons exposée d'après M. *Osmond;* les travaux modernes l'ont étendue et complétée sans la détruire.

a) *Si l'on trempe aux températures élevées*, c'est-à-dire au-dessus de la courbe BEC, et le plus énergiquement possible, par exemple dans l'eau glacée, la ferrite, la perlite et la cémentite disparaissent.

Deux cas peuvent se présenter, selon que la teneur en carbone est inférieure ou supérieure à celle de l'eutectique :

Acier à 0,45 °/₀ de carbone.	Acier à 1,5 °/₀ de carbone.
Trempons-le à 1050° ; les réactions et procédés micrographiques décèlent la présence de la *martensite* dont les aiguilles deviennent plus petites et moins distinctes à mesure que l'on s'approche de l'eutectique.	Au delà de la teneur en carbone correspondant à l'eutectique, l'acier n'est plus homogène après la trempe et se laisse facilement rayer, au moins en certaines régions, par une aiguille à coudre. Un acier à 1,5 0/0 de carbone trempé dans l'eau glacée se partage en deux constituants : l'un, l'*austenite* (1), l'autre, la cémentite qui se reconstitue et dont la formation limite celle de l'austenite.

b) *Si l'on trempe aux températures relativement basses*, il y a à distinguer deux nouveaux cas.

(1) L'*austenite* est un sixième constituant primaire des aciers au carbone n'apparaissant que dans les aciers trempés extra-carburés.

Il en sera question ultérieurement à l'exposé de la théorie générale des aciers de la première série de *Roberts-Austen*.

Trempe au-dessous de BEC et au-dessus de A_1E (*v. diagramme*).	Trempe au-dessous de A_1E (*v. diagramme*).
On retrouvera dans l'acier trempé les constituants déjà isolés pendant le refroidissement lent avant la trempe. Dans un acier à 0,3 0/0 de carbone, trempé à 720°, on trouvera de la ferrite et de la martensite partiellement formée.	Dans ce cas, la structure est constituée ; la trempe ne produit plus d'effet.

L'analyse précédente suffit pour montrer la complexité du phénomène, car il n'y a pas seulement à faire entrer en compte la température de trempe, il faut aussi considérer un facteur qu'on peut rendre variable à volonté, à savoir, le *liquide trempant*.

On conçoit donc que des constituants de transition, tels que la *troostite* ou autres encore inconnus, puissent apparaître.

Article 2. — Aciers spéciaux de la 1re série de Roberts-Austen

Nous examinerons spécialement les *aciers manganèse* et *les aciers nickel*.

Puis nous reviendrons sur l'histoire des *aciers au carbone* que nous essaierons de rattacher à celle des *aciers manganèse* et des *aciers nickel*.

Nous dirons enfin quelques mots des *aciers au bore et au cuivre*.

I. — *Aciers manganèse.*

Il y a à distinguer tout d'abord les aciers au carbone dans lesquels le manganèse entre en proportion plus ou moins grande sans en constituer l'élément actif prépondérant, puis les aciers dans lesquels le manganèse est l'élément donnant au métal ses propriétés caractéristiques.

A. — *Influence du manganèse sur les propriétés des aciers au carbone.* — Les études ayant pour but de déterminer l'influence du manganèse sur les propriétés des aciers au carbone sont dues à *Mrazek*, professeur à l'école des mines de *Przibram*, qui opérait au creuset et d'autre part

à la Cie de *Terrenoire* qui présenta à l'Exposition de 1878 une série d'aciers obtenus au four *Martin* en grandes masses, ayant une teneur à peu près constante en C et autres éléments étrangers et une proportion de *Mn* variant de 0,500 à 2,500 0/0.

D'après *Mrazek*, *Mn* facilite le travail au rouge et cette influence favorable se fait plus sentir au blanc qu'au rouge ; cet élément craint un peu le carbone, mais n'exerce pas la mauvaise influence de *Si* et de *Ph*.

Les études de *Terrenoire* complètent les expériences de laboratoire de *Mrazek*.

1° — *Traction*. — Pour le métal recuit, *Mn* a sur R une influence un peu moindre qu'un tiers de celle du carbone ; et si l'on admet qu'aux environs de 0,300 de C une augmentation ou une diminution de 0,100 0/0 dans la teneur en C fait monter ou descendre R de 6 kilog. environ par mmq., on peut dire, et cela est très près de la vérité, qu'autour de 0,500 0/0 de *Mn*, 0,100 0/0 en plus ou en moins de cet élément augmente ou diminue R de 1 k. 800 à 2 kilog. par mmq.

La limite élastique E est reculée par la présence de *Mn* et si dans les aciers carburés, cette limite est voisine de 45 à 50 0/0 de R, elle est supérieure à 50 0/0 pour les aciers manganésés et voisine de 55 0/0. *C'est là un fait important à signaler en ce qui concerne l'obtention pratique des aciers devant supporter de grandes charges sans se déformer d'une manière permanente.*

Par contre A 0/0 diminue avec l'augmentation de la teneur en *Mn*, mais dans une faible proportion, car cette influence n'est guère que de 1/7 à 1/8 de celle de C : ainsi 0,100 0/0 de C en plus diminue A d'environ 1/0/0 tandis que 0,100 0/0 de *Mn* ne le diminue guère que de 0,50 0/0.

Or, il résulte de ces deux faits combinés (*augmentation de R et faible diminution de A 0/0*) une augmentation considérable de Tr qui devient supérieur à celui qui correspond aux meilleurs aciers carburés.

Ainsi, d'une manière générale, *Mn* améliore la qualité des aciers au point de vue de la traction lorsqu'on cherche une forte valeur pour E, c'est-à-dire un fort allongement élastique allié en outre à une faculté d'allongement encore considérable à la rupture : *une teneur voisine de 1 0/0 ou 1,200 0/0 de manganèse paraît toutefois devoir être un maximum dans la pratique usuelle, surtout si la teneur en carbone atteint 0,5 à 0,6 0/0* (soit 5 à 6 millièmes).

2° — *Flexion et chocs*. — *Dans les épreuves par flexion* on constate une

augmentation considérable de E*f*, une faible flèche, c'est-à-dire une grande raideur et en outre une forte valeur pour R*f*, contrairement à ce qui a lieu pour les aciers simplement carburés, pour lesquels une forte valeur de E*f* correspond à une valeur de R*f* relativement faible : ce sont là des faits très remarquables.

Le manganèse peut donc être utilement employé jusqu'aux teneurs voisines de 1 0/0 pour les pièces devant supporter sans déformation de grands efforts de flexion et même de torsion telles qu'essieux, manivelles, arbres coudés, etc..., et en général toutes pièces de machines, pourvu que la teneur en carbone ne dépasse pas 0,6 à 0,7 0/0. Au-dessus de 1 0/0 à 2 0/0 de M*n*, les aciers présentent *aux chocs une bonne résistance et une grande raideur ;* au-dessus de cette limite, ils deviennent fragiles lorsque la teneur en C est voisine de 0,500 0/0 (*cinq millièmes*).

Toutes ces conclusions s'appliquent, bien entendu, au métal recuit : dans le cas de pièces devant être trempées, on ne pourrait pas employer les aciers extra-manganésés (de 1 0/0 à 2 0/0), vu la fragilité qu'apporte M*n* à la trempe ; toutefois certains aciers légèrement manganésés et peu carburés donnent d'excellents résultats par une trempe à l'huile.

3° — *Rôle général du manganèse.* — Le manganèse maintient le fer à l'état β et le carbone à l'état de carbone de trempe d'autant plus longtemps qu'il est en proportion plus forte. Cet effet est absolument comparable à celui que produirait un refroidissement rapide sur un acier non manganésé de même teneur en C : en un mot, la présence de M*n* équivaut à une trempe plus ou moins dure.

On s'explique facilement pourquoi les alliages de fer et de manganèse perdent progressivement leurs propriétés magnétiques à mesure qu'ils deviennent plus riches en M*n* et cessent d'être complètement magnétiques au-dessus de 25 0/0. C'est que le fer y est alors sous la forme β, la même qui se produit dans le fer pur vers 860°.

Nous reviendrons ultérieurement sur ce point spécial afin de le préciser.

B. — *Aciers manganèse proprement dits.* — Les usines françaises et les usines allemandes conclurent après de nombreuses expériences qu'il n'y avait pas d'intérêt à accroître la teneur en manganèse dans les aciers au carbone au delà de 2 0/0 parce qu'alors on tombait sur des produits sans valeur pratique, très fragiles et d'une sensibilité exagérée au feu et à la trempe.

[illegible] de Mn = 1.4 à 1 de carbone est extrêmement fragile et ne peut se traiter en fonderie sans un nombre [illegible] l'allongement 0 0 peut descendre au-dessous de [illegible]

Les aciers en étaient à mand un [illegible] d'acier fondu de *Sheffield*. [illegible] donner le monde métallurgique par la production d'aciers manganèse avant des propriétés remarquables et des teneurs en manganèse variant de [illegible] à 21 0 0 [illegible]

[illegible] comme on l'avait fait déjà en *France* et en *Belgique* [illegible] de 2 à 2.5 à 1 de Mn on n'obtenait que des produits sans valeur mais à partir de 7.5 à 1 de Mn on avait un [illegible] et nous dirons en quelques mots.

Les caractères généraux de ces aciers à haute teneur de manganèse est de s'adoucir par la trempe à l'eau et de regagner leur dureté par le réchauffage au rouge [illegible]

L'acier renfermant de 7.5 à 21 à 1 de Mn est complètement sans [illegible] les moulages d'une résistance étonnante au choc et à l'usure. [illegible] les moulages sont d'une dureté telle à [illegible] qu'on ne peut les [illegible] qu'à la meule d'émeri. On fait ainsi des [illegible] qui coupent sans être trempés et qu'il suffit de [illegible] en temps. Les aciers se laminent et se forgent assez [illegible] après ce travail de déformation [illegible]

Les barres de traction prennent des allongements considérables [illegible]

Ces [illegible] propriétés de l'acier manganèse s'accentuent à mesure que la teneur augmente, entre 7 0 0 et 14 0 0. Au delà de 14 0 0 les allongements décroissent.

Voici quelques données tirées d'une étude de M. *Ferd. Gautier* :

CARBONE	MANGANÈSE	E	R	A °/₀ sur 200 mm	OBSERVATIONS
0.47	7.22	»	42k	1.56	Etat ordinaire
0.61	9.37	»	50	5.46	id.
»	»	»	59.5	14.84	trempé à l'eau
0.85	12.29	42k8	60.2	3. 5	état ordinaire
»	»	35.4	90	42.78	trempé à l'eau
0.85	14.01	»	55	1.56	état ordinaire
»	»	»	103	44 44	trempé à l'eau
1.50	15.22	»	67.2	1.04	état ordinaire
»	»	»	68 1	11.71	trempé à l'eau
1.54	18.4	49.4	78.4	0.78	état ordinaire
»	»	35.5	82 1	10.	trempé à l'eau
1.60	19.1	54	78.2	0.78	état ordinaire
»	»	34	89.5	4. 6	trempé à l'eau
2.10	21.69	»	55.1	8.59	état ordinaire
»	»	»	51.2	10.93	trempé à l'eau

Le tableau suivant donne les résultats d'expériences faites sur des barreaux à 14 0/0 de M*n*.

BARREAUX	DIAMÈTRES	R	A °/₀
Forgé.	18 mm	57 k°	1.56
Recuit	id.	75	14.06
Trempé à l'huile . .	id.	86	26.56
Trempé à l'eau. . .	id.	105	44.44

M. A. Le Chatelier dans d'autres essais a obtenu une charge de rupture de 107 k. avec 51,8 0/0 d'allongement pour un acier manganèse à 13,9 0/0 trempé au jaune dans un mélange réfrigérant.

Lorsque pour une proportion déterminée de M*n*, la teneur en C augmente, la résistance et l'allongement diminuent à la fois.

La résistance à la flexion et au choc d'un acier manganèse est beaucoup plus considérable que celle des aciers durs au carbone, à cause de son grand allongement uni à sa grande résistance; cependant il résiste moins au ployage; il faut remarquer en effet que, dans cette épreuve, c'est surtout l'allongement de striction qui entre en jeu. Or, l'acier manganèse n'a pas de striction, son allongement est le même

en tous ses points, soit 50 0/0 au maximum. Dans les aciers doux au carbone, au contraire, l'allongement de striction varie de 100 à 200 0/0.

La résistance à la compression d'un acier-manganèse est relativement faible en même temps que sa dureté minéralogique est très grande. Si l'on fait deux burins, l'un d'acier extra dur au carbone, l'autre d'acier manganèse, le premier ne raye pas le second mais peut y imprimer son tranchant. Le second n'entame pas non plus le premier parce que son tranchant s'écrase.

L'acier manganèse n'est plus magnétique à partir de 14 0/0.

L'examen attentif des résultats des essais ne permet cependant pas de tirer des conclusions absolument nettes et de déduire des lois générales car on ne possède pas de séries régulières de ces métaux à faible teneur en C; il est par suite impossible, dans chaque cas particulier, de faire la part exacte de ce corps et celle de M*n*.

On a pu récemment ajouter quelques nouveaux métaux à la série encore bien discontinue de ces curieux aciers-manganèse et cela pour des teneurs variant de 2 à 7 0/0. C'est, en effet, dans cette région de la série que les métaux obtenus paraissent le moins utilisables et sont, peut-être, le moins connus. Voici quelques nouvelles données les concernant que nous empruntons presque *textuellement à un travail* de M. *Osmond* et qui précisent les propriétés générales développées plus haut.

1°) — Jusqu'à 3,5 0/0 environ de M*n* les propriétés typiques, c'est-à-dire la dureté minéralogique et le magnétisme ne paraissent pas subir de changement radical : les métaux correspondants *ont leurs points critiques au-dessus de 400°*. Ces aciers sont magnétiques et peu ou pas magnéti-polaires sur barreaux courts; on sait qu'on dit qu'un barreau n'est pas magnéti-polaire quand il cesse d'être un aimant et que les molécules reprennent des positions quelconques après l'ouverture du circuit.

Vers 3,5 0/0, on rencontre des aciers qui peuvent être durs ou doux à volonté. L'échantillon suivant confié à M. *Osmond* par M. *Hadfield* et contenant : C = 0,30; S*i* = 0,18; M*n* = 3,25 à 3,89 sous forme de petite barrette forgée était très dur.

Après un réchauffage à 800° suivi d'un refroidissement spontané dans le four *Leclerq et Forquignon* et point critique vers 400° il s'est adouci tout en restant assez dur; après un second réchauffage (cette fois à 1000°), refroidissement dans les mêmes conditions, point critique vers 425°, il est devenu doux à la lime.

2°) — Entre 3,5 et 7 0/0 environ on obtient des aciers qui, refroidis lentement, rayent le verre, sont magnétiques et magnéti-polaires, c'est-à-dire peuvent constituer des aimants permanents; leur point de transformation s'abaisse au-dessous de 400°.

M. *Osmond* cite comme exemple deux échantillons fournis par M. *Hadfield* :

1er échantillon — C = 0,45; S*i* = 0,11; M*n* = 4,00

2e échantillon — C = 0,32; S*i* = 0,26; M*n* = { 5,04 / 6,31

Le 1er échantillon a son point de transformation entre 300 et 200°, le second au-dessous de 100°.

Si maintenant on dépasse 7 0/0 jusqu'à 14 0/0 environ, on trouve une partie des métaux dont nous avons parlé au début et constituant la plus grande partie des *aciers-manganèse* connus, difficiles à limer et à travailler à l'outil sans trop grande dureté minéralogique toutefois, susceptibles de grands allongements sans striction, privés de tout point critique notable pendant le refroidissement lent.

3°) — Jusqu'à 14 0/0 environ de M*n*, le magnétisme se conserve tout en diminuant notablement; au delà de cette teneur il disparaît complètement; le métal devient très dur.

Au point de vue exclusif de la dureté il semble que le maximum soit atteint vers 6 à 7 0/0; elle paraît décroître un peu et arriver à un minimum relatif à 10 0/0 environ de manganèse, puis elle augmente de nouveau d'une façon constante. Pour les teneurs voisines de 20 à 22 0/0 le métal, tout en possédant une résistance bien supérieure à celle de la fonte, acquiert des propriétés comparables à celles de ce dernier métal.

Il semble toutefois, malgré les obscurités ou lacunes encore existantes, qu'il soit possible de discerner dans les aciers manganèse au sens général du mot, c'est-à-dire depuis les plus faibles teneurs jusqu'aux plus fortes :

1°) Un groupe d'aciers relativement doux, magnétiques, peu ou pas magnéti-polaires sur barreaux courts.

2°) Un groupe d'aciers durs (en valeur absolue ou relative), magnétiques et magnéti-polaires.

3°) Un groupe d'aciers difficiles à travailler à froid, sans grande dureté minéralogique, déformables toutefois et non magnétiques.

Nous verrons plus loin comment on rattache ces divers groupes entre eux à l'aide de la théorie allotropique.

II. — *Aciers nickel.*

Nous devons aux travaux de M. *Werth* dont le nom a été déjà si souvent cité dans notre travail des renseignements fort précieux au sujet des propriétés générales de ces aciers. En nous aidant des résultats publiés par les *aciéries et forges de Saint-Étienne*, des travaux de M. *Riley* et de M. *Osmond*, nous pourrons donner une idée suffisante de ce qu'on peut actuellement attendre de ces aciers spéciaux nés d'hier et ayant créé, à côté de l'ancienne série des aciers au carbone, des séries rivales tendant à prendre une place de plus en plus grande dans les applications industrielles.

Les classifications qui suivent ne présentent, bien entendu, aucun caractère absolu, et si certaines teneurs en nickel n'y figurent point, c'est qu'il a été jugé industriellement inutile de fabriquer des métaux ne donnant pas de résultats assez supérieurs à ceux des classes voisines. Leur prix eût été majoré d'autant sans trop d'avantages ; il ne faut pas oublier en effet que le nickel coûte encore cher et que son introduction en quantité assez appréciable dans le métal est un des obstacles à la vulgarisation de ces aciers spéciaux.

A — *De 0 à 5 0/0 de nickel.* — Le nickel en faibles proportions exerce sur l'acier une influence analogue à celle du manganèse, il agit à la façon d'une trempe et paraît surtout très efficace pour modifier le grain. Il a une tendance à favoriser l'enchevêtrement des dendrites formées par les cellules simples, l'état général de l'acier est plus vitreux, les éléments en sont moins individualisés, la cassure est plus nerveuse. La valeur de R est augmentée ainsi que celle de E, A 0/0 paraît peu modifié, mais la résistance au choc paraît bien supérieure.

En outre, le métal prend mieux la trempe : il résulterait en effet d'expériences dues à M. *Mercadier* que le nickel tend à rendre le métal de plus en plus isotrope.

A ces faibles teneurs on l'associe souvent au chrome, on a ainsi des métaux dans lesquels la fissilité est réduite au minimum et qui présentent, vu leur homogénéité très grande, une résistance considérable aux chocs. Les aciers chromés et à 2 à 3 0/0 de nickel sont particulièrement connus par leur application aux blindages et au

métal à canons. Ces aciers dans lesquels peut rentrer une quantité variable de chrome (de 1 à 2 0/0) sont susceptibles d'un grand avenir, car ainsi qu'on le verra par l'étude des aciers chromés, ils présentent une forte résistance aussi bien à la rupture par traction qu'à la rupture par flexion et sont très aptes à supporter les chocs à la condition qu'ils soient assez doux par le carbone et n'en contiennent pas plus de 0,04 à 0,6 0/0. Il semble que vu leur prix relativement peu élevé, étant donné leur faible teneur en nickel, ils soient destinés à se répandre dans l'industrie, soit pour certaines pièces de machines, soit comme tôles, barres, essieux, etc...

Ainsi, pour fixer les idées, avec une teneur en nickel de 2 0/0, une teneur égale en chrome et une faible teneur en carbone 0,4 0/0 (soit 4 millièmes), on obtient un métal possédant après trempe et recuit une limite élastique E voisine de 70 kilos, avec une résistance à la rupture R comprise entre 80 et 90 kilos, pliant en outre à bloc en épaisseur de 10 mm. Sa cassure entièrement amorphe ne présente pas d'apparence de grain; ce métal non fissil jouit en outre de la propriété remarquable de ne jamais taper à la trempe, propriété que ne présentent malheureusement pas toujours les aciers chromés simplement carburés. On dirait que le nickel associé au chrome en pareille proportion permet à celui-ci de communiquer à l'acier les propriétés qui lui sont spéciales tout en le préservant des accidents qu'amène souvent le chrome en la présence seule d'une assez forte proportion de carbone.

Mais pour que ces propriétés remarquables puissent être acquises, l'absence du soufre est nécessaire; dès que la proportion de ce métalloïde atteint 3 à 4 millièmes, il ne faut plus compter sur les résultats précités.

Si laissant de côté les aciers nickel chromés on ne considère que les aciers nickel légèrement carburés ou manganésés, on obtient à la traction les résultats suivants donnés par M. *James Riley de Chicago* :

Acier à 1 0/0 de nickel tenant 0,42 0/0 de C et 0,58 0/0 de Mn.

	E	R	A % mesuré sur 100 mm	STRICTION
	k.	k.		
Métal coulé et recuit. . .	4[illegible]0	85 0	1.5	9.5
Métal laminé	50 0	90.0	11.0	24 0
Métal laminé et recuit . .	47.0	87.0	18.7	45.0

D'une manière générale les aciers de 2 à 3 0/0 de nickel se laissent façonner à chaud et à froid sans difficulté. Leurs caractéristiques à la traction sont :

Sur éprouvettes de 100 mm., forgées et recuites : E = 40 k. ; R = 65 k. ; A 0/0 = 20.

Sur éprouvettes de 100 mm., trempées et recuites : E = 45 à 50 k. ; R = 70 à 75 k. ; A 0/0 = 16 à 18.

Acier à 3 0/0 de nickel tenant 0,35 0/0 de C et 0,57 0/0 de Mn.

	E	R	A °/₀ MESURÉ sur 100 mm	STRICTION °/₀
	k	k		
Métal coulé	31.0	54.5	2.5	5.6
Métal coulé et recuit . .	37.0	54.5	2.5	9.0
Métal laminé	49.0	80.0	20.3	37.0
Métal laminé et recuit . .	44.0	76.0	20.3	42.0

Le travail à chaud produit donc sur ces métaux une sorte d'écrouissage ; il est du reste assez délicat à pratiquer et produit quelquefois des criques et gerçures qu'il importe d'enlever soigneusement lors du forgeage ou du laminage à l'aide de la gouge ou de la tranche à chaud. Au-dessus de 5 0/0, le travail est beaucoup plus facile. Quant au travail à froid *(poinçonnage, cisaillage, etc.)*, il n'est possible sans danger qu'avec une teneur minima en carbone.

B — *De 5 à 20 0/0 de nickel.* — L'emploi de ces aciers avait donné lieu jusqu'à ces derniers temps à bien des méprises parce qu'on voulait les traiter absolument comme les aciers simplement carburés. On les tenait ainsi pour *fragiles* et excessivement durs ; les recuits ordinaires ne permettant pas de les adoucir et de les travailler à froid.

C'est par recuit effectué à basse température ou plutôt par une sorte de revenu vers 400 ou 450° (*entre le bois fumant et le bois flambant*), revenu analogue à celui auquel on soumet les ressorts d'acier au carbone après leur trempe à l'eau qu'on donne à ces aciers des propriétés qui les rendent fort précieux. Si le recuit est poussé plus loin, *du rouge sombre au rouge cerise*, on opère comme une sorte de trempe, qu'on

refroidisse ces aciers rapidement ou lentement à l'air ou dans des matières peu conductrices, telles que la cendre, la chaux, etc...

On constate, en outre, que l'action durcissante de teneurs croissantes en carbone et en manganèse se maintient comme dans les aciers ordinaires de même composition chimique.

Voici quelques résultats d'essais à la traction :

1° — *Aciers de 5 à 7 0/0 de nickel.* — Les essais de traction effectués sur barreaux recuits à basse température *(bois flambant)* donnent :

E — de 45 à 55 k. R — de 60 à 80 k. A 0/0 mesuré sur 100 mm. de 22 à 15 0/0.	selon les teneurs en C et Mn.

A cet état de recuit spécial, tous ces aciers peuvent subir les différents travaux à froid. Si les essais de traction sont effectués sur barreaux recuits aux températures ordinaires, soit du rouge cerise un peu avancé au rouge cerise clair, on trouve pour :

E — de 55 à 75 kg. R — de 80 à 100 kg. A 0/0 — de 16 à 12 0/0	selon les teneurs en C et M*n*.

On peut encore exécuter le travail à froid mais avec grande difficulté ; en tout cas la ductilité a considérablement diminué, ainsi qu'en témoignent les essais de pliage, et cela d'autant plus que ces aciers ont été recuits à plus haute température.

Au point de vue de la trempe ces aciers sont bien moins sensibles que ceux à teneurs plus faibles en nickel et à fortiori que les aciers ordinaires ; les effets de la trempe dépendent du reste de leur teneur en C et en M*n*.

Un acier à 5 0/0 de nickel ayant donné après recuit à basse température :

R = 66 kg., A 0/0 = 22 et une striction de 56 0/0 a donné la même striction après trempe au rouge clair et revenu au rouge sombre, 13 0/0 pour A et 90 kg. pour R.

2° — *Aciers de 10 à 20 0/0 de nickel.* — Des essais de traction effectués sur barreaux recuits à basse température (*bois fumant*) donnent :

E — de 55 à 80 kg.
R — de 75 à 110 kg. } selon les teneurs en C et en M*n*.
A — de 18 à 12 0/0

Ainsi recuits ces aciers supportent très aisément toutes les variétés du travail à froid.

Si les essais de traction sont effectués sur barreaux recuits aux températures ordinaires, soit du rouge sombre au rouge cerise clair, on trouve pour :

E — de 75 à 120 kg.
R — de 100 à 160 kg.
A — de 13 à 6 0/0

Le travail à froid n'est pas possible pratiquement sur un métal ainsi recuit, mais on pourra utiliser un pareil traitement quand on voudra durcir superficiellement certaines surfaces (plaques de blindages, pièces de machines, etc.....) en se mettant à l'abri des tapures.

Au point de vue de la trempe, ces aciers manifestent une réelle insensibilité, quelle que soit l'énergie du liquide trempant, c'est-à-dire ne durcissent ni ne s'adoucissent; l'état du métal, après cette opération, étant le même qu'après un recuit à même température.

C. — *De 20 à 25 0/0 de nickel.* — Ces aciers sont extrêmement remarquables par leur grande malléabilité et leur inoxydabilité presque complète.

L'influence durcissante de la trempe, qui s'atténuait avec les aciers à teneurs inférieures à 20 0/0, à mesure que la proportion de nickel augmentait, devient négative, pour les aciers à 20 ou 25 0/0. La résistance à la rupture R diminue, A 0/0 augmentant.

Le mandrinage à froid augmente E et R tout en conservant au métal des allongements encore très élevés ; la trempe à l'eau adoucit notamment le métal et le rend très malléable.

Un acier de 20 à 25 0/0 de nickel trempé donne après mandrinage à froid : E = 50 à 55 kg. ; R = 80 à 85 kg. ; A 0/0 sur 50 mm. = 30 à 35.

Avant mandrinage, ces mêmes aciers trempés à l'eau donnent E = 35 kg., R = 67 à 75 kg. ; A 0/0 sur 50 mm. = 45 à 50 0/0.

Avant trempe, après forgeage sans recuit : E = 45 kg. ; R = 80 à 85 kg ; A 0/0 sur 58 mm. = 30 à 35 0/0.

Mais les résultats précédents, qui suffisent pour donner une idée des propriétés de ces métaux, ne sauraient être considérés comme absolus, car la proportion plus ou moins grande de carbone contribue pour sa part à les modifier.

La valeur du rapport $\frac{S-S'}{S}$ semble varier dans d'assez étroites limites, quels que soient les divers traitements subis, sans que le fuseau soit accusé ; car, comme l'acier manganèse, l'acier nickel semble s'allonger sur toute sa longueur au lieu de s'amincir en un seul point comme l'acier ordinaire.

Le travail à chaud et notamment le laminage paraissent écrouir considérablement ce métal, car on constate, dans la plupart des essais sur métal laminé que E est réduite fortement par le recuit.

Ainsi un acier à 25 0/0 de nickel ; 0,27 0/0 de C ; 0,85 0/0 de Mn a donné après laminage : E = 60 kg., R = 80 kg. 2, ce même métal recuit après laminage a donné : E = 20 kg., R = 70 kg.

L'usinage de ces aciers à haute teneur a présenté à l'origine de grandes difficultés ; on a pu le mener à bien en employant des machines-outils très puissantes permettant d'exercer des pressions considérables sur les outils : on a employé pour ceux-ci l'acier chromé trempé et faiblement revenu ou des aciers au tungstène de très grande dureté. L'angle de coupe a été pris très obtus afin d'éviter le refoulement des tranchants et supprimer le broutement. Néanmoins pour les travaux à froid comportant des tolérances très resserrées 1/50 ou 1/100 de mm., on ne saurait employer ces aciers sans inconvénients à cause de la nécessité où l'on se trouve de terminer les passes avec un même outil forcément très fatigué après un si dur travail.

Pour les pièces exigeant un simple travail d'alésage on emploie avec beaucoup d'avantages l'acier à 20 ou 25 0/0 de nickel, surtout quand ces pièces affectent la forme de cylindres, auquel cas on leur donne des propriétés remarquables par le mandrinage à froid. Le même métal sera fort judicieusement employé pour les tôles minces par suite de son inoxydabilité, de sa grande résistance jointe à une malléabilité permettant de réduire les épaisseurs et de les cintrer et ployer à froid.

Pour compléter cet aperçu général il faut dire qu'on peut encore obte-

nir une série d'aciers de duretés variables par le carbone, le silicium, le manganèse et le chrome qu'on adjoint au nickel.

On voit donc quelles ressources considérables offre au constructeur la série tout à fait remarquable des aciers nickel.

Nous donnons enfin, pour terminer, les nombres qu'on peut considérer comme typiques pour caractériser un acier nickel à 25 0/0 *en admettant que les teneurs en carbone et en manganèse soient assez faibles.*

	E	R	A °/₀	$\frac{S-S'}{S}$
Naturel / Recuit rouge cerise	50	75	28 °/₀	60 °/₀
Trempé rouge cerise	28	70	40 °/₀	65 °/₀

A tous les états le métal plie à bloc sans gerçures. Ces aciers sont en outre susceptibles d'un très beau poli qui ne s'altère presque pas sous les influences atmosphériques (1).

D — *Points de transformation des aciers nickel (M. Osmond).* — Le cas du nickel a été à cet égard aisément étudié parce que l'on peut obtenir des aciers-nickel pauvres en C.

On doit aux recherches de M. *Hadfield* et à celles de la Cie *des Aciéries de Saint-Etienne* des séries d'échantillons bien appropriées où la teneur en C reste très faible.

Si l'on examine avec grande attention ces différentes séries *(et nous renvoyons pour cette étude aux tableaux remarquables qu'ont publiés les Aciéries de Saint-Etienne lors de la récente Exposition de cette ville)*, on remarque que pour des barreaux recuits :

— La résistance à la rupture par traction R s'élève d'abord progressi-

(1) Les alliages de fer et de nickel possèdent une autre particularité intéressante, celle de devenir facilement *schisteux* sous l'influence du forgeage.

Cette schistosité, mise en évidence par toutes les méthodes d'attaque, se traduit par la formation de bandes alternativement plus et moins attaquées, s'enveloppant les unes les autres, et permettant de suivre la répartition des déformations dues au forgeage ou au laminage (*Osmond*).

Il y a là, pour le constructeur, matière à réflexion ; et, peut-être, ne serait-il pas inutile d'établir des tableaux comparatifs donnant les diverses caractéristiques du métal à la traction sur des éprouvettes prises en long et en travers.

vement avec la teneur en nickel et A 0/0 décroît d'une façon correspondante.

— Entre 10 et 24 0/0 environ, R reste voisine d'un maximum et la ductilité d'un minimum.

— Enfin vers 25 0/0, R s'abaisse et A 0/0 se relève.

Les nombres que nous avons rapportés plus haut d'après les essais de M. *Werth* conduisent du reste à ces résultats.

La série se subdivise donc en 3 groupes :

— *1er groupe.* — Les points critiques d'abord séparés se réunissent et s'abaissent progressivement (515 à 500° pour 7,65 de N*i*) ; la dureté à la lime ne paraît guère différer de celle des aciers ordinaires ; *les barreaux ne gardent pas notablement le magnétisme rémanent.*

— *2e groupe.* — Le point de transformation s'abaisse au-dessous de 400 à 350° ; à 130-120° pour 15,48 de N*i* ; à 85-65° pour 19,64 de N*i* et la transformation n'est pas complète à la température ordinaire pour 24,51 de N*i* ; en même temps la dureté s'élève beaucoup ; sans atteindre celle des aciers durs au carbone trempés, elle rend pratiquement très difficile le travail à l'outil ; *les barreaux courts gardent le magnétisme rémanent.* On peut s'assurer que l'apparition de la dureté coïncide avec celle du dégagement de chaleur pendant le refroidissement.

— *3e groupe.* — Vers 25 0/0 de nickel ou un peu au-dessus, il n'y a plus de point critique pendant le refroidissement lent, la dureté minéralogique est faible, le travail à l'outil possible, sinon facile, le *métal est pratiquement non magnétique.*

On peut d'ailleurs vérifier, sur les séries des Aciéries de *Saint-Etienne*, que la dureté à la traction varie en sens inverse de la teneur en C pour les métaux à 25 0/0 de N*i* recuits ou trempés à l'huile.

Dans la série à 15 0/0 de N*i*, la dureté à la traction, après avoir augmenté en même temps que C, diminue rapidement pour des additions de C successives.

Telle est, au point de vue des transformations allotropiques et exposée par M. *Osmond* avec la précision accoutumée, l'histoire des aciers nickel.

III. — *Comment, avec les faits actuellement acquis, la théorie rend-elle compte des propriétés des aciers au carbone, au nickel et au manganèse?*

Précisons maintenant la méthode dont s'est servi M. Osmond pour découvrir les différents états allotropiques du fer; nous aurons amplement recours pour cela aux deux importants mémoires de cet ingénieur sur la *méthode de refroidissement* et *sur les essais de trempe.*

Il en résultera l'établissement *d'une ébauche de théorie générale* rendant compte dans une certaine mesure, avec les faits actuellement acquis, des propriétés des aciers de la 1re série de *Roberts-Austen.*

A. — *Courbes de refroidissement.* — Un corps chaud se refroidissant librement; si l'on prend pour abscisses les températures successives du

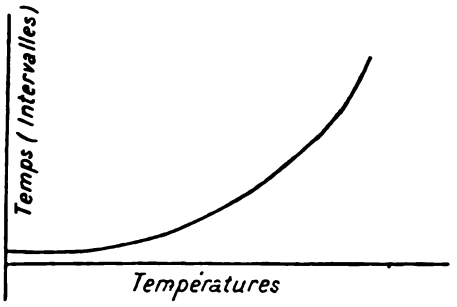


Fig. 241.

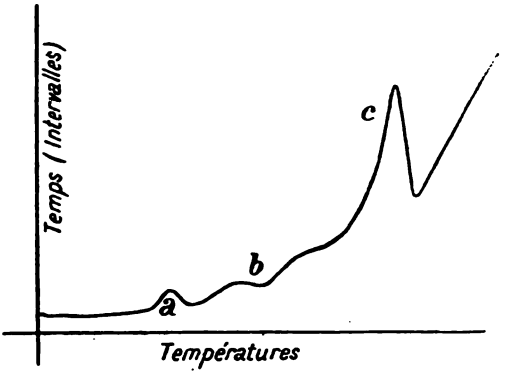


Fig. 242.

corps et pour ordonnées les temps croissants qu'a mis le thermomètre à s'abaisser d'un même nombre de degrés on aura, en général, une courbe telle que l'indique la figure 241.

Si l'on remarque sur la courbe différents accidents tels qu'un *renflement a*, une *dépression b*, une *flèche aiguë c*, c'est qu'il est survenu un ralentissement pendant le refroidissement, une accélération ou un arrêt (Voir fig. 242).

En admettant que les conditions extérieures n'aient subi aucune modification brusque, chacune de ces perturbations révélera soit un dégagement, soit une absorption spontanés de chaleur et correspondra soit

à la production d'une modification allotropique, soit à une réaction chimique, etc...

Tel est le principe de la *méthode de refroidissement* inaugurée par *Regnault* et appliquée si judicieusement par M. *Osmond* à l'étude des aciers. Et si la méthode réciproque de l'échauffement n'a pas prévalu, cela tient à la difficulté de maintenir une enceinte à température constante.

B. — *Des trois états du fer :* α, β et γ. — A l'inspection des courbes de refroidissement tracées plus loin, on constate que pour les aciers au carbone considérés il se produit un, deux ou trois dégagements de chaleur pendant le refroidissement.

Dans le fer électrolytique qui se rapproche le plus de la pureté, ces dégagements sont au nombre de deux : le premier a_{r3} brusque à 855°, le second a_{r2}, progressif entre 740 et 700°.

Ce dernier point d'après les recherches de M. *Osmond* correspondant seul à l'apparition du magnétisme, ce savant ingénieur a été amené à conclure que a_{r3} et a_{r2} correspondaient chacun à une transformation moléculaire distincte du fer.

Ainsi le fer serait à l'état α *au-dessous de* a_{r2}, β *entre* a_{r2} *et* a_{r3} *et* γ *au-dessus de* a_{r3}.

A l'origine de la théorie on avait pu, pour plus de simplicité, et en l'absence de raisons décisives, réunir et considérer comme rattachés à un phénomène unique les deux points a_2 et a_3 : il a fallu les séparer quand on a montré qu'un seul a_2 coïncidait à l'exclusion de l'autre avec l'apparition ou la disparition du magnétisme. Les deux variétés β et γ se trouvaient donc confondues dans la théorie antérieurement exposée et dite du fer β.

Un 3e point ar_1 presque nul dans le fer électrolytique correspond à un dégagement de chaleur croissant d'abord avec la teneur en C, devenant très fort dans l'acier dur et décroissant quand on passe de l'acier dur à la fonte. Ce point correspond au phénomène dit de la *récalescence* car la chaleur dégagée peut, dans certaines conditions, ramener la température du métal du rouge très sombre au rouge cerise : il indique la transformation du C de trempe simplement dissous dans le fer en C de recuit formant avec le fer un composé défini et isolé de la masse sous la formule probable Fe^3C.

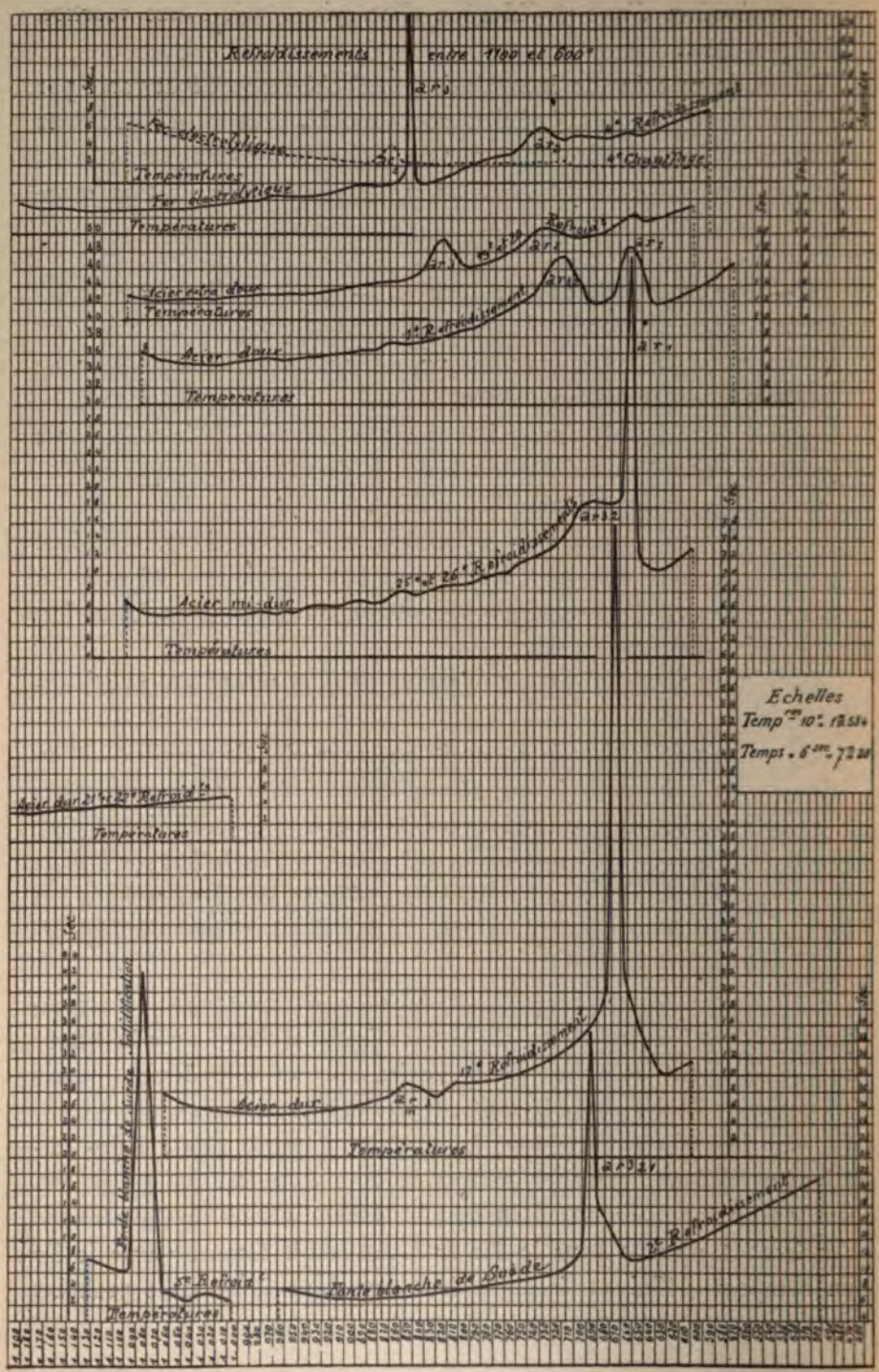


Fig. 243. — Courbes de refroidissement.

La position normale de ces points critiques pendant le refroidissement lent est approximativement :

Pour a_1	Pour a_2	Pour a_3
Transformation du C de trempe en C de recuit ou carbure de fer Fe^3C. Température : 650°.	Coïncidant avec l'apparition du magnétisme et correspondant à la transformation en fer β. Température : 700 à 740°.	Coïncidant avec la transformation en fer γ. Température : 855°.

Aujourd'hui encore, ajoute M. *Osmond*, on doit envisager comme possible, à la suite des essais de M. le docteur *Ball* et de M. *Curie*, la nécessité ultérieure d'un dédoublement du fer γ. Il y aurait donc à ajouter un quatrième point critique a_4, du moins dans les aciers très doux, vers 1300° environ. Nous ne possédons pas encore de données suffisantes sur le *point de Ball* pour en tenir compte. Néanmoins, nous en dirons quelques mots ci-dessous.

La position des points a_1, a_2, a_3 n'est pas fixe sur l'échelle des températures, elle varie ainsi qu'on sait avec la composition chimique, la température initiale, la vitesse du refroidissement et peut-être aussi avec la pression.

Une teneur croissante en C relève a_1 de 650 à 700° et abaisse d'abord a_3 ; pour une teneur en C de 0,30 0/0, a_3 se confond avec a_2 ; pour une teneur en C de 0,50 0/0, le point double a_{32} s'est beaucoup rapproché de a_1 ; pour C> 0,80 0/0 la confusion des trois points est complète.

Il résulte enfin d'expériences nombreuses et de déductions rigoureuses que ce sont bien les points a_3 et a_2 du fer qui se retrouvent dans les points doubles ou triples a_{32} et a_{321} des aciers, car les courbes des pouvoirs thermoélectriques et de la résistance électrique par rapport à la température présentent au point a_3 quand il est isolé des phénomènes typiques qui se transportent au point a_{321} des aciers durs ; l'apparition du magnétisme qui est caractéristique du point a_{r2} se retrouve aux points ar_{32} et ar_{321}, etc...

C. — *Sur le point de Ball.* — En 1890, au meeting de *l'Iron and*

steel Institute, le Dr *Ball* publiait le résultat d'expériences faites en 1884, tendant à rendre probable l'existence d'un nouveau point critique du fer vers 1300°; M. Curie la confirmait récemment.

Il serait téméraire d'affirmer que le dégagement de chaleur du point a_4 puisse être exclusivement attribué à une nouvelle transformation allotropique du fer.

Quelles que soient les précautions prises, le métal s'oxyde superficiellement dans les diverses opérations accomplies, la solidification de la scorie qui s'est formée dégage de la chaleur.

Le changement de structure, dû à la cristallisation du fer, intervient à son tour.

On voit donc combien le problème est difficile à résoudre.

Quoi qu'il en soit, et sans nier l'existence d'une nouvelle forme allotropique *qui pourrait être le retour à l'état* α, le point de *Ball* paraît correspondre à la température de soudure du fer.

Quelle est la cause pouvant empêcher la soudure du fer quand ce métal a été chauffé en atmosphère oxydante, sinon l'oxyde de la surface? Le fer se soude, en effet, vers 700° dans une atmosphère d'hydrogène.

L'obstacle à la soudure n'existe plus si l'oxyde vient à fondre; quand il est devenu liquide, les surfaces sont décapées. Et c'est pour abaisser son point de fusion qu'on ajoute dans les forges comme fondants du sable ou du borax sur les surfaces à souder.

Qu'il nous suffise de signaler l'existence probable du nouveau point a_4, de nouvelles expériences encore plus concluantes sont nécessaires pour l'établir définitivement comme certaine.

Ajoutons toutefois que ce changement moléculaire possible vers 1300° semble n'intéresser que d'une manière très éloignée la question du traitement des aciers.

D. — *Permanence des formes allotropiques.* — Les formes allotropiques β et γ peuvent-elles être maintenues en totalité ou en partie à la température ordinaire, étant donné ce que l'on sait sur l'instabilité de ces formes pour certains corps?

La physique nous apprend, d'une part, que les corps dissous exercent sur les dissolvants ce qu'on appelle la *pression osmotique*, celle-ci abaissant les points de congélation et de volatilisation du dissolvant. Les pressions, au sens ordinaire du mot, déplacent aussi les points de congélation et de volatilisation, elles les abaissent ou les relèvent selon

leur signe et celui du changement de volume accompagnant le changement d'état.

Nous savons, d'autre part, qu'au rouge C se diffuse dans le fer amenant à la coïncidence avec a_{r1} les poins a_{r3} et a_{r2} dans les aciers durs : nous savons aussi que M*n*, N*i*, C*u* abaissent également les trois points de transformation, quelquefois même au-dessous de la température ordinaire. Certains carbures doubles tels que $(Fe\text{-}Mn)^3C$, $(Fe\text{-}Cr)^3C$, etc... agissent de même, paraît-il.

Ne sont-ce pas là des manifestations bien nettes de l'existence des pressions osmotiques ?

Quant au rôle des pressions extérieures, il suffit de rappeler les effets de la trempe par compression de M. *Clémandot*, ceux du laminage terminé au rouge sombre et enfin ceux même de la trempe.

Chaque variété allotropique du fer a son coefficient de dilatation propre, plus les points critiques seront abaissés, plus le changement brusque de volume sera grand : de là, les ruptures si fréquentes déterminées par la trempe (*Le Chatelier*). N'est-il pas naturel de concevoir que ces tensions considérables produites dans un solide pratiquement incompressible puissent déterminer la conservation de telle ou telle forme allotropique du fer instable à la température ordinaire sous la pression atmosphérique ?

D'un autre côté les pressions étant engendrées par les transformations mêmes, une transformation ne pourra être arrêtée que si elle est partiellement accomplie. (Exemple : *vaporisation de l'eau arrêtée quand la pression a atteint une certaine valeur fonction de la température*). De là, la possibilité théorique et probablement la nécessité de la présence simultanée de deux au moins des états du fer dans les métaux où l'on a retardé les transformations.

Le fer α est magnétique : c'est celui que nous connaissons le mieux, puisqu'il est dans le fer pur refroidi lentement, métal dans lequel toutes les transformations se sont faites à leur température normale.

Les variétés β et γ ne sont pas magnétiques, réunissons-les avec M. *Howe* sous la dénomination unique de fer *non* α. Dans un mélange moléculaire de fer α et de fer non α, on conçoit que ce dernier puisse se comporter comme une résistance passive qui fera obstacle à la polarisation du fer et conservera cette polarisation quand elle aura été une fois obtenue. La présence des molécules inertes du fer non α, dit M. *Osmond*, serait la cause nécessaire et suffisante de ce qu'on appelait au-

trefois la force coercitive : de même la pierre d'aimant Fe^3O^4 est formée d'un corps magnétique FeO et d'un corps non magnétique Fe^2O^3. Le magnétisme rémanent est nul quand la totalité du fer est à l'état α, passe par un maximum pour un mélange de fer α et de fer non α et redevient nul quand il n'y a plus de fer α.

Les faits paraissent donner confirmation à cette manière de voir puisque le magnétisme total est maximum avec le fer pur et diminue progressivement à mesure que C, M*n* et N*i* augmentent.

E. — *Classification générale des aciers au carbone, au nickel et au manganèse.* — Si maintenant, il est possible par des artifices spéciaux de conserver à la température ordinaire les deux formes qui ne s'y trouvent pas naturellement en équilibre, on doit s'attendre à rencontrer, parmi les innombrables variétés des aciers, trois types généraux bien distincts, suivant que α, β ou γ *dominera et imposera sa marque* (*Osmond*).

Les trois types ou groupes existent réellement et correspondent bien à la conservation de chacune des formes du fer, indépendamment des moyens mis en œuvre pour obtenir cette conservation. Les uns auront été réalisés parce que des corps tels que N*i*, M*n*, C*u* auront abaissé ou même supprimé les points de transformation, d'autres l'auront été par des trempes appropriées, etc...

En fait, ces trois groupes ont été étudiés en détail pour les aciers manganèse et les aciers nickel.

1°) — Nous avons considéré un groupe d'aciers (*le troisième*) difficile à travailler à froid, sans grande dureté minéralogique, déformables et *non magnétiques ;* ce groupe comprenait les aciers à plus de 13 0/0 de M*n* et ceux à 25 0/0 de N*i*.

Ces métaux n'ont pas de transformation du tout ; le fer y est donc par définition à l'état γ. Nous négligeons, bien entendu, de tenir compte du point a_4 indiqué par *Ball*, confirmé par M. *Curie* et sur lequel les données sont encore trop incomplètes.

Peut-on rattacher à ce groupe certains aciers au carbone ?

Il est permis de répondre affirmativement.

Et d'abord relevons avec M. *Osmond* une erreur de méthode fort grave.

Le carbone, le nickel et le manganèse constituent trois éléments susceptibles d'abaisser ou même de supprimer les points de transfor-

mation. L'un d'entre eux, le carbone, a la propriété de former avec le fer pendant le refroidissement lent un composé défini susceptible de s'isoler dans la masse. *Au nickel et au manganèse actifs on ne saurait comparer le carbone inactif isolé sous forme de carbure de fer mais seulement le carbone actif, celui que la trempe conserve sans que nous en connaissions exactement la vraie nature.* Seuls les aciers au carbone trempés peuvent être comparés aux aciers nickel et manganèse : *il est absurde de croire qu'on rendra des métaux différents comparables, en leur faisant subir des traitements identiques.*

Cette digression indispensable étant faite, voyons s'il existe des aciers au carbone analogues aux aciers nickel ou manganèse à haute teneur. Pour cela trempons la différente série de ces aciers assez rapidement pour déterminer la diffusion complète du carbone. La dureté minéralogique croît, suivant une loi mal connue, avec le carbone, depuis celle du fer doux jusqu'à celle de l'orthose; le magnétisme rémanent augmente parallèlement. Ces 2 variables paraissent atteindre un maximum pour une teneur en C voisine de 1 0/0.

Quand le carbone s'élève au-dessus de 1 0/0 environ, on voit apparaître un nouveau constituant appelé *austenite* par M. *Osmond* en souvenir de la grande part prise par le professeur *Roberts Austen* à l'établissement de la théorie allotropique, d'une part, et de ses nombreux travaux, d'autre part, se rapportant à la métallurgie générale.

La proportion de l'*austenite* croît avec la teneur en C jusqu'à 1,6 0/0 de C mais ne peut dépasser 50 0/0 et reste limitée par la formation de la *cémentite*. Les propriétés de l'*austenite* la rapprochent beaucoup de l'acier manganèse à 12-13 0/0 et de l'acier nickel à 25 0/0.

2°) — Nous avons considéré aussi un groupe d'aciers doux (le *premier*) magnétiques, peu ou pas magnéti-polaires sur barreaux courts. Ces métaux ont leurs points critiques au complet et placés au-dessus de 400° environ : la plus grande partie du fer y est à son état normal, l'état α. Nous avons vu comment s'y répartissaient les aciers nickel ou manganèse à faible teneur; il est inutile de parler ici des conditions dans lesquelles on obtient le fer α dans les aciers au carbone, c'est l'histoire des divers procédés calorifiques antérieurement étudiés.

3°) — *Passons au 2e groupe*, celui des cas intermédiaires qui sont l'immense majorité et ressortissent notamment au phénomène de la trempe, soit celui des aciers plus ou moins durs et magnéti-polaires qu'on obtient toutes les fois que pour une raison quelconque les points de trans-

formation ont été abaissés au-dessous de 350 à 400° environ. La trempe contribue pour une grande part à donner une catégorie d'aciers appartenant à ce groupe, car elle ne supprime jamais complètement les transformations. Et en effet, on constate un dégagement de chaleur quand il est possible de suivre le refroidissement ; de plus les métaux considérés étant magnétiques, on est certain que les transformations se sont effectuées au moins en partie, mais elles sont forcément restées incomplètes puisque les propriétés finales diffèrent très notablement du fer doux.

M. *Osmond* attribue les propriétés caractéristiques de ces aciers à la conservation d'une partie du fer à la forme β, la transformation du fer β en α se limitant elle-même par la pression qui résulte du changement de volume. Quoique cette hypothèse paraisse vraisemblable il resterait à prouver directement par l'expérience que les transformations du fer sont incomplètes. Pour cela, il faudrait :

1° — *Mesurer les quantités de chaleur normalement dégagées aux points* a_{r2} et a_{r3} *pendant le refroidissement du fer pur ;*

2° — *Mesurer la quantité de chaleur réellement dégagée au point double* a_{r32} *par les aciers qui restent comme trempés après refroidissement lent ;*

3° — *Montrer que cette seconde quantité de chaleur est inférieure à la somme des deux premières.*

Or, en pratique, la comparaison est difficile, car on n'a pas *d'aciers sans carbone*, puis on n'a pas de procédé exact pour transformer en calories les retards observés pendant le refroidissement et l'on ne sait pas, du reste, comment les chaleurs de transformation varient avec les températures où les transformations se produisent.

Quant à l'inspection des courbes de refroidissement, elle est insuffisante pour des mesures de cet ordre.

En admettant que la transformation de β en α soit incomplète dans les aciers trempés ou assimilables, cette transformation y est au moins partielle puisque les aciers en question sont *magnétiques ;* de plus cette transformation de β en α, en a_{r2}, se réunit à celle de γ en β, en a_{r3}, qui la précède normalement et qui dégage beaucoup plus de chaleur. La fraction supposée supprimée de a_{r2} ne représente donc, dans les cas les plus favorables, qu'une assez petite partie du dégagement de chaleur subsistant lequel comprend la transformation probablement totale de γ en β, plus la transformation partielle de β en α.

Incidemment il reste à montrer pourquoi la démonstration donnée par M. *Osmond* pour prouver que c'est *bien exclusivement à la présence du fer β que les aciers trempés doivent leurs propriétés spéciales* n'est plus regardée par lui comme *concluante*.

L'analyse micrographique a montré que l'acier trempé dans ces conditions entre a_{r3} et a_{r1} était formé de 2 constituants principaux *ferrite* et *martensite* séparés par une zone irrégulière de transition remplie par de la *troostite*. Le mélange se laisse limer parce qu'il contient une proportion suffisante de constituants doux *ferrite* et *troostite* et donne la réaction du carbone de trempe par la *martensite* qui est dure et par la *troostite*. Les anciennes conclusions de M. *Osmond* ne restent donc applicables qu'à la *troostite;* mais comme on ne sait pas préparer la *troostite* pure, elles ne sont pas probantes puisque, dans le mélange, la douceur et le carbone de trempe n'appartiennent pas simultanément à toute la masse.

IV. — *Aciers au cuivre.*

Les aciers au cuivre ne sont pas encore entrés dans la pratique courante. Ce sont des aciers au carbone préparés à la façon ordinaire et additionnés d'une quantité de cuivre variant de quelques millièmes à 3 ou 4 et même 5 0/0.

Pour que ces métaux puissent supporter le travail à chaud, il importe qu'ils soient pauvres en carbone; dans ces conditions, ils sont relativement doux, A varie alors entre 22 et 25 0/0, E assez élevé varie de 31 à 35 kg. pour des valeurs de R comprises entre 48 et 55 kg.

La trempe produit une certaine modification des propriétés mécaniques, mais A n'est pas abaissé au-dessous de 15 0/0, la striction restant toujours assez forte.

Quand ces aciers ont une assez forte teneur en cuivre (5 0/0 environ), ils présentent cette particularité qu'ils ne peuvent se forger sans criquer, *qu'à une très haute température*. Dès que la température baisse au-dessous d'une limite qui paraît correspondre à la température de fusion du cuivre, le métal crique aux angles sous le marteau en lançant des étincelles bleues de cuivre. En cassant à froid la barre dans la partie criquée, les cristaux de la cassure sont recouverts d'un enduit de cuivre, ce qui semble indiquer que dès que le cuivre se solidifie, il passe en grande partie dans le ciment de l'acier (*Brustlein*).

Etudions l'influence de la présence du cuivre sur la position des points critiques, d'après les résultats publiés par M. *Osmond* concernant 3 échantillons à lui fournis par le professeur *Roberts-Austen* et préparés par *Edwin J. Ball* et *Arthur Wingham :*

1er échantillon : C = 0,102 0/0 — C*u* = 0,847 0/0
2e échantillon : C = 0,183 0/0 — C*u* = 4,100 0/0
3e échantillon : C (moins de 0,10 0/0) — C*u* = 4,44 0/0

Pour le métal à 0,847 de C*u*, les 3 points a_{r3}, a_{r2}, a_{r1} sont bien différents, mais a_{r3} dont la position normale est à 855° a déjà été abaissé de 40 à 50°. Quand la teneur en C*u* augmente, a_{r3} vient se confondre avec a_{r2} vers 710°, a_{r1} descend également.

On peut retenir que 4 0/0 *de* C*u produisent à peu près le même effet sur la transformation du fer que 0,20 de carbone.*

V. — *Aciers au bore.*

Nous ne citons ces aciers que pour mémoire, car nous ne croyons pas qu'ils puissent avoir, actuellement, aucune application pratique. Le professeur *Roberts-Austen* en a préparé en fondant ensemble dans le vide du fer et du bore cristallisé.

L'action du bore est analogue à celle du carbone.

Le point a_{r3} est généralement abaissé de 40 à 50°.

La proportion de bore peut osciller entre 0,3 0/0 et 1 0/0 avec une teneur en carbone voisine de 1 0/0.

Ces aciers ont des propriétés magnétiques comparables à celles des aciers au carbone seul de même pourcentage (*Me Sklodowska Curie*).

Article 3. — Aciers spéciaux de la deuxième série de Roberts-Austen

Nous étudierons successivement l'influence *du chrome, du tungstène, de l'aluminium* et *du silicium* sur les propriétés de l'acier; nous terminerons enfin par quelques considérations ayant trait à l'influence nuisible du *soufre* et du *phosphore*.

I. — *Aciers au chrome.*

Nous savons d'après la loi de *Roberts-Austen* que les corps de la deuxième série, c'est-à-dire ceux dont le volume atomique est supérieur à celui du fer, *exercent une action équivalente* à celle d'un recuit ou d'un revenu. Ces corps tendent à relever pendant le refroidissement les transformations physico-chimiques connues : toutefois le chrome ne paraît pas avoir d'action sur les modifications moléculaires du fer.

A. — *Propriétés des aciers chromés à chaud.* — Nous avons vu dans la première partie de ce Traité combien à l'état de fusion ces aciers avaient tendance à s'oxyder.

M. *Brustlein* qui a, comme on sait, introduit le premier en *France* cette fabrication, nous apprend qu'à la forge un lingot d'acier chromé se travaille *sans plus de précaution* qu'un acier ordinaire de même dureté : il offre cependant à chaud une plus grande résistance à la déformation. Le lingot coupé à chaud au couperet présente une bavure de rencontre entre les deux coupes s'amincissant d'une façon remarquable avant de se rompre ; c'est là pour le métal l'indice d'une grande ductilité. L'acier chromé ne craint pas plus le feu, *ou même moins*, qu'un acier au carbone de même dureté.

Il n'y a donc pour ces aciers spéciaux qu'une difficulté d'élaboration à cause de leur facilité d'oxydation, mais il faut retenir, contrairement à une opinion assez répandue, *qu'ils peuvent se manipuler comme les aciers ordinaires* dans les diverses transformations du travail à chaud (*Aciers à outils*, *obus de rupture*, etc...).

Le chrome allié au fer ne lui communique pas la propriété de prendre la trempe comme le carbone, mais un acier *chromé et carburé* prend plus vivement la trempe et devient plus dur qu'un acier à même teneur en carbone. Par la trempe à une température convenable à l'eau ou à l'huile, ces aciers prennent un grain fin à tel point que, pour de fortes teneurs en *Cr* et en C, la cassure est pour ainsi dire vitreuse. Dans le cas d'une trempe trop énergique, ils deviennent très sujets aux tapures.

La couche d'oxyde qui se forme au chauffage des lingots ou des barres est plus forte et plus adhérente que dans l'acier ordinaire et ne se dissout pas bien dans le borax. Aussi les aciers chromés se soudent-ils

difficilement ou pas du tout dès que la teneur en chrome est un peu notable.

B. — *Qualités de résistance des aciers chromés.* — Les expériences de M. *Brustlein*, aux aciéries d'*Unieux*, ont démontré que le chrome exerçait une influence très heureuse sur les qualités des aciers.

Le chrome augmente R et E, comme cela a lieu pour les aciers manganésés, tout en laissant à l'acier l'allongement correspondant à sa teneur en C ; c'est-à-dire qu'un acier chromé, tout en présentant la résistance d'un acier dur, est moins cassant qu'un acier de même dureté simplement carburé.

Le rapport $\frac{E}{R}$ est plus grand que pour les aciers au carbone, comme on peut le voir d'après les deux exemples suivants, échantillons A et B trempés à l'huile et recuits, essayés par M. *Brustlein*.

Echantillons	Limite élastique	Resistance à la rupture	Allongement %
A	100 k. 10	110 k. 40	4. 50
B	46 k.	71 k. 80	15. 50

Quoique présentant une forte valeur pour R, ces aciers ont une *striction* très accusée : la valeur de R/ est par suite très grande. En somme on peut obtenir pour le métal chromé, avec un R donné, une flexion correspondant à celle que donnerait un acier ordinaire moins résistant ou plus doux : bien traité, l'acier chromé offre donc une plus grande sécurité.

En même temps que la dureté minéralogique est augmentée, le grain devient plus fin et plus homogène ; à la rupture par flexion la cassure est souvent nerveuse, ce qui dénote une grande ductilité

Il est difficile d'indiquer entre quelles limites oscillent E et R, car ces deux caractéristiques varient notablement avec les proportions relatives de C et de Cr. Nous savons toutefois qu'on ne peut encore obtenir des aciers très doux avec une assez forte proportion de chrome, soit ayant 1 à 2 0/0 de chrome avec 1 à 2 milliémes de carbone : les aciers chromés sont donc généralement assez durs. Les aciers chromés, doux par le

carbone, contiennent de 6 à 12 millièmes de C associés à 1 ou 2 0/0 de Cr ; dans les nuances très dures le carbone peut atteindre la proportion de 1 0/0.

La résistance au choc des aciers chromés est considérable, nous sommes convaincu que l'acier au carbone (*nuance acier à canon*) légèrement chromé offrirait à ce point de vue de grandes garanties.

Nous avons vu quel avantage procurait à l'acier l'association du chrome et du nickel : les plaques de blindage faites avec cet acier présentent une résistance à la pénétration de 25 0/0 supérieure à celle des plaques en acier ordinaire ; en même temps elles se comportent comme celles en fer au point de vue des fentes.

C. — *Travail à froid.* — A froid dans le travail au tour, au rabot, etc... un acier notablement chromé, à 2 0/0 par exemple, est toujours un peu plus dur à couper que l'acier ordinaire; néanmoins, s'il est convenablement recuit, la différence n'est pas très grande. Avec des teneurs moindres en chrome, les aciers, même à 1 0/0 de carbone, se travaillent sans difficulté au tour (*Brustlein*).

D. — *Théorie de l'action du chrome.* — Le chrome peut exister dans l'acier, d'après M. *Osmond*, sous trois états au moins, séparément ou simultanément:

1° *A l'état de chrome dissous ;*

2° *A l'état de composé de chrome, de fer et de carbone sous forme de globules isolés ;*

3° *Au même état, sous forme de dissolution solidifiée.*

1°) — *Action directe du chrome.* — La présence du chrome pur, dissous dans l'acier, élève la température à laquelle se produit, toutes choses égales d'ailleurs, la transformation du carbone.

C'est là une influence opposée à celle du manganèse ; si donc le manganèse remplace une trempe, on peut dire que *l'action du chrome a quelque analogie avec celle d'un revenu.* Les aciers chromés peuvent devoir à cette circonstance la propriété qu'ils possèdent d'être peu fragiles, eu égard à leur dureté (*Osmond*).

Précisons en ce qui concerne les points ar_3, ar_2, ar_1 :

(*a*) — *Position des points* ar_3, ar_2 *et* ar_1. — Le chrome n'abaisse pas ar_3, il ne maintient donc pas le fer à l'état β et n'est pas de ce chef une cause de dureté, en l'absence du carbone.

Comme son volume atomique est supérieur à celui du fer; selon toute apparence, sa présence dans les aciers doit tendre à faire disparaître ar_3.

Les courbes de refroidissement n'indiquent cependant pas une action bien caractéristique à cet égard, mais il faut remarquer :

1°) Que le volume du chrome (7,7) est bien voisin de celui du fer (7,2).

2°) Que l'action des teneurs croissantes en chrome est combattue par celle des teneurs croissantes en carbone. Nous n'ignorons pas, en effet, la difficulté d'obtenir des aciers doux en carbone notablement chromés.

3°) Que l'action directe du chrome résultant de la loi des volumes atomiques peut être considérablement amoindrie par l'action en sens inverse exercée par l'un des composés *fer, chrome, carbone* déjà cités.

Pour ce qui concerne ar_2, il paraît acquis que le chrome ne fait pas sentir notablement son action.

Quant à ar_1, il est élevé; le chrome avance donc la transformation du carbone de trempe en carbone de recuit pendant le refroidissement de l'acier.

(*b*) — *Etude de la structure.* — Les expériences de M. *Osmond* conduisent à des résultats importants d'un autre ordre concernant la structure.

Le chrome empêche ou tout au moins gêne considérablement la cristallisation du fer.

Ce fait est mis en évidence, soit par l'absence des lamelles alternantes du Docteur *Sorby*, soit par l'absence ou la diminution du grain, comme l'avait montré M. *Brustlein*.

Cette action bienfaisante du chrome, qui se traduit par l'amélioration des propriétés mécaniques primordiales, se fait surtout sentir dans les teneurs moyennes de ce métal. Au delà de 0,5 0/0 de chrome, la structure, quoique bien meilleure que celle d'un acier simplement carburé, tend néanmoins à se rapprocher de celle des aciers au carbone : le composé *fer, carbone, chrome* commence à se former. L'absence des lamelles alternantes (*sorbite*) paraît toutefois caractériser la structure de toute l'échelle des aciers au chrome, forgés ou recuits.

2°) — *Composés fer, carbone, chrome.* — Le composé *fer, carbone, chrome*, à l'état de globules très durs, enchâssés dans une pâte très malléable doit être la cause de la grande dureté minéralogique des aciers notablement chromés. Le même composé, à l'état dissous et en proportion variable selon les proportions des divers constituants,

semble jouer un rôle éminemment actif. Grâce à l'introduction du carbone dans la molécule, il empêcherait, comme les corps à faible volume atomique, la transformation du fer β en fer α.

Les données concernant ces divers composés sont encore peu précises ; les récents travaux de M. *Ad. Carnot* ont néanmoins contribué à éclaircir cette question fort complexe.

Les ferrochromes contiendraient le composé $Fe^3C,3Cr^3C^2$ et les aciers faiblement chromés le composé $3Fe^3C,Cr^3C^2$.

La voie est donc ouverte et l'on peut espérer que les remarquables méthodes d'analyse des métaux ferreux dues à M. *Ad. Carnot* conduiront bientôt, si elles sont judicieusement appliquées, à la connaissance complète de ces composés indispensable à posséder pour établir sûrement la théorie des aciers de la seconde série de *Roberts-Austen*.

E. — *Types d'aciers chromés*. — Nous donnons ci-dessous quelques types d'aciers chromés.

		Cr	C	Mn	Si
Echantillons Hadfield.	1	0,29	0,16	0,18	0,07
	2	0,48	0,15	0,21	0,10
	3	0,84	0,12	0,18	0,08
	4	1,18	0,27	0,21	0,12
Echantillons des Usines d'Assailly (Loire).	1	2,5	0,501	0,23	0,273
	2	2,83	0,81	0,21	0,274
	3	3,44	1,21	0,32	0,280

II. — *Aciers au tungstène, à l'aluminium, au silicium, au molybdène, etc...*

A. — *Aciers au tungstène*. — Le tungstène comme le chrome présente quelques anomalies par rapport à la loi de *Roberts-Austen*. Il peut relever comme tous les corps de sa série ar_1 et ar_3, ar_3 se rapprochant de sa position normale à 855° et tendant à disparaître pour remonter probablement jusqu'au point de solidification.

Néanmoins, dans certains cas, ce corps donne lieu à des particularités

spéciales encore inexpliquées : on suppose qu'il forme avec le carbone un composé analogue à celui du chrome jouissant des propriétés aciérantes des corps de la première série de *Roberts-Austen* et contrebalançant dans une plus ou moins grande mesure l'action directe exercée par la proportion du tungstène non entré en combinaison avec le fer et le carbone. C'est ainsi qu'on peut se rendre compte de l'abaissement, dans certains aciers au tungstène, du point de transformation du carbone de trempe en carbone de recuit et, grâce à cette persistance du carbone, du maintien du fer à l'état β.

Seul dans un métal presque sans carbone, le tungstène a une influence presque négligeable n'ayant pas d'action sensible sur les points de transformation du fer. Mais en présence du carbone, et s'il est d'autre part en proportions très fortes, ce métal peut communiquer à l'acier une dureté telle que le simple refroidissement à l'air suffit pour donner une trempe très énergique et fournir des outils destinés à travailler les aciers au carbone trempés. La proportion de tungstène peut atteindre 6 à 8 0/0 dans ces aciers extra-durs. Leur grain est d'une finesse extrême et l'aspect de la cassure encore plus soyeux que celui des aciers trempés.

On sait que les points critiques ar_3, ar_2, ar_1 se déplacent lorsqu'on fait varier la température initiale et la vitesse du refroidissement. Le déplacement de ces points critiques avec la température initiale du refroidissement *est un caractère qualificatif de la présence du chrome et du tungstène en proportions notables* (*Osmond*).

Prenons l'exemple suivant cité par M. *Osmond* et voyons les conséquences pratiques qu'il déduit.

Soit un acier au *tungstène* de composition suivante :

C : 0,42 — S*i* : 0,05 — S : 0,01 — P*h* : 0,02 — M*n* : 0,28 — W : 6,25.

La figure ci-après donne les courbes de refroidissement à partir des 3 températures initiales de 920° — 1015° — 1210°. Ces trois courbes sont très nettement différentes.

— 1°) *Si l'on refroidit à partir de* 920°, on a deux points critiques voisins et inégaux : le 1er entre 690° et 680° ; le 2e vers 650°.

— 2°) *Si le chauffage a été poussé à* 1015°, le 1er point reste à sa place (670-660°) mais le 2e s'abaisse brusquement à 525-515°, c'est-à-dire de 130°.

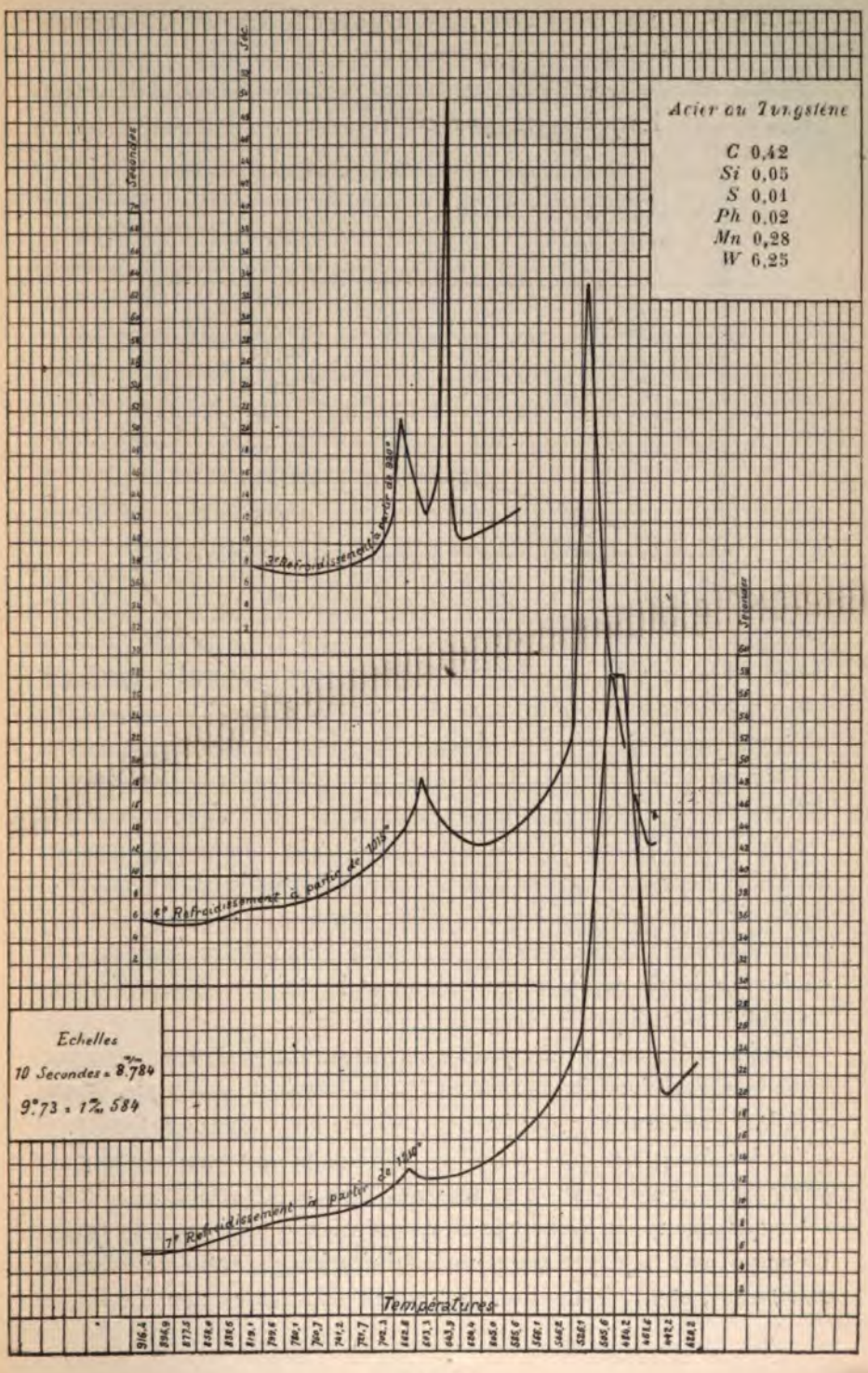

Acier au Tungstène
C 0,42
Si 0,05
S 0,01
Ph 0,02
Mn 0,28
W 6,25
Sec.
Secondes
Secondes
3e Refroidissement à partir de 820°
4e Refroidissement à partir de 720°
7e Refroidissement à partir de 1240°
Echelles
10 Secondes = 8.784
9.73 = 1.584
Températures
916,4
896,9
877,5
858,0
838,6
819,1
799,6
780,1
760,7
741,2
721,7
702,3
682,8
663,3
643,9
624,4
605,0
585,6
566,1
546,7
527,2
507,8
488,2
468,7
449,2
429,8

Fig. 244.

outils soumis à des chocs tels que forets de mine, ciseaux à froid, etc...

Dans des teneurs voisines de celles qu'on recherche pour le chrome, soit de 1 à 2 ou 2,5 0/0, le tungstène ne donne pas à l'acier des propriétés bien supérieures à celles que lui donnerait le chrome à teneur égale.

L'acier à 1,5 0/0 de carbone et 0,78 0/0 de tungstène convient très bien pour le métal des filières ; dans des teneurs de 1 à 2 0/0 on peut l'employer avec succès pour la fabrication de certains ressorts que l'on veut très élastiques.

En résumé, quand on recherche des aciers très durs pour outils, la teneur en tungstène peut croître beaucoup ; dans les autres cas tout en pouvant être supérieure à celle du chrome, la teneur en tungstène peut osciller entre 1 et 3 à 4 0/0, pourvu que la teneur en carbone ne soit pas trop forte et n'excède pas 1 à 2 0/0.

L'acier au tungstène ne se forge qu'entre le rouge cerise et le jaune, et encore avec difficulté, ce qui restreint beaucoup son usage. Après plusieurs réchauffages, il s'oxyde et perd ses propriétés spéciales : cette formation d'acide tungstique, fort préjudiciable du reste à la ténacité du métal, peut se faire même lors d'un premier chauffage, pour peu que l'atmosphère soit oxydante.

Pour les teneurs de 6 à 12 0/0 de tungstène la trempe est inutile, elle peut même être nuisible et provoquer des tapures : pour les teneurs inférieures, il ne semble pas que cette opération soit délicate, elle rend le métal très dur et lui donne une structure presque vitreuse.

Les résistances à la traction oscillent, selon les teneurs de C et de tungstène, entre des limites très grandes et suivant des lois non encore éclaircies. Pour un acier refroidi lentement après forgeage R varie de 48 à 74 kilos, E de 33 à 44 kilos par mm².

Pour un acier trempé à l'huile et revenu, R varie de 5 à 100 kilos, E de 35 à 75 kilos par mm².

Le revenu après la trempe exerce sur les propriétés mécaniques des aciers au tungstène une action analogue à celle qu'on constate pour les aciers au carbone.

L'allongement 0/0 varie dans de très grandes limites ; il en est de même pour la striction. Aux teneurs maxima en C et en tungstène, il peut descendre jusqu'à 3 ou 4 0/0 après trempe.

B. — *Aciers à l'aluminium.* — L'aluminium exerce, comme on sait,

[illegible] à [illegible] de l'acier et [illegible] disposition [illegible] [illegible] à [illegible]

[illegible] par [illegible] l'aluminium. [illegible] de cette dénomination inexacte [illegible] une certaine quantité d'aluminium.

[illegible]

[illegible] M. [illegible] tendent à démontrer que l'aluminium en proportion suffisante empêche la transformation du fer, mais non comme [illegible] jusqu'à maintenant. C'est la transformation [illegible] qui est empêchée, puisque [illegible] *dans la fonte et l'acier.*

L'aluminium ajouté à l'acier s'éliminerait en partie en rétrécissant, comme on l'a constaté [illegible] de la fabrication des aciers sans soufflures; [illegible] général, comme il vient d'être dit, sur les transformations du fer.

Quant à l'action de l'[illegible] sur la fonte, elle paraît plus nette.

[illegible] la fonte [illegible] en [illegible] moins de carbone [illegible] la résistance de la fonte à la flexion peut, dans [illegible] 2.[illegible] et la résistance au choc de 700 0. [illegible] propriétés mécaniques de la fonte alu[illegible] de l'aluminium [illegible] la plus grande du [illegible] sous un état très divisé.

6. — *Aciers au molybdène.* — Ces aciers ne sont pas encore entrés *définitivement* dans le commerce et nous ne croyons pas que, sauf pour ce qui concerne leurs propriétés magnétiques, des études spéciales aient été entreprises dans le but de déterminer les variations des points critiques.

	Mo	C	Si	Mn
Types d'aciers au molybdène de la Société *Châtillon et Commentry.*	3,48	0,51	0,08	0,34
	3,36	1,25	0,03	0,21
	4,05	1,24	0,03	0,22
	3,91	1,72	0,04	0,33

D. — *Aciers au silicium.* — Le silicium, selon toute apparence, empêche le fer α de prendre la forme β aux températures élevées. Comme il est difficile de fabriquer des aciers siliceux qui ne soient en même temps assez manganésés, il est fort délicat de discerner le rôle du silicium. Les fontes dont on se sert pour l'apport du silicium, *ferro-silicium* ou *ferro-manganèse-silicium*, contiennent en effet du manganèse en proportion notable.

Nous empruntons à un mémoire de M. *Ferd. Gautier* un certain nombre de données concernant les aciers spécialement riches en silicium.

Un fabricant de *Sheffield*, M. *Vickers*, avait proposé aux chemins de fer français des bandages en acier fondu d'une extraordinaire résistance. L'analyse chimique fit découvrir dans l'acier dont ils étaient constitués une proportion de silicium relativement forte : on attribua par suite à la présence de ce silicium, soit seul, soit accompagné de M*n* la plus grande partie des propriétés de cet acier.

On sait que les causes d'absorption de S*i* par l'acier fondu sont nombreuses, soit que cet acier ait été préparé au creuset (*action sur la pâte argileuse du creuset*), soit qu'on ait voulu préparer un acier à moulages à l'aide de F*e*-S*i* ou de F*e*-M*n*-S*i*.

La pratique avait appris qu'avec une faible teneur en C (*2 millièmes environ*), les aciers pouvaient contenir sans inconvénient jusqu'à 0,5 0/0 (*5 millièmes*) de silicium. On redoutait, avec des aciers à 4 ou 5 millièmes de C (0,4 0/0 ou 0,5 0/0), de leur incorporer des proportions égales ou plus fortes de S*i*. L'expérience apprit qu'il existait une série *utilisable d'aciers au silicium*, pourvu que la proportion de carbone fût convenablement établie et ne crût pas toutefois en raison directe de celle du silicium.

Il n'a pas encore été possible de discerner les lois générales régissant les propriétés des aciers siliceux à cause de l'influence des corps autres que C et S*i* existant presque toujours en proportion non négligeable dans le métal.

Il semble toutefois que lorsque le silicium varie entre 1 et 2 0/0, le carbone ayant des teneurs voisines de 1 0/0, on réalise des *aciers à outils* très résistants.

Les outils se forgent très bien et acquièrent par la trempe à l'eau une grande dureté.

Les données concernant les *aciers de forge* riches en silicium sont

encore trop incertaines pour que nous citions des nombres ; nous croyons avec M. *Howe* qu'on ne saurait le faire qu'à titre de curiosité.

Enfin on peut citer comme aciers siliceux les aciers à outils riches en carbone (1 0/0) et dans lesquels se trouvent des teneurs beaucoup plus faibles en silicium (*de 1 millième à 1 centième*) : on prétend que ces aciers se comportent aux essais comme ceux des premières marques pour outils.

Il y aurait donc une série complète d'aciers siliceux très aptes à travailler les métaux à teneur moyenne de 1 0/0 en C, S*i* variant de 1 millième à 2 et 2,5 0/0.

L'étude de l'influence du silicium sur la position des points critiques a été faite par M. *Osmond* à l'aide d'échantillons fournis par M. *Hadfield* dans lesquels la teneur en silicium pouvait être considérée comme la seule variable, les variations du carbone et du manganèse étant assez faibles.

1° — *Point* a_{r3}. — Le point a_{r3} tend à remonter avec des teneurs croissantes en silicium et à se rapprocher de la position normale qu'il occupe dans le fer pur. Comme l'aluminium, le silicium supprime la transformation moléculaire du fer et maintient le fer à l'état α dans la région où il devrait prendre régulièrement l'état β.

2° — *Point* a_{r2}. — Le silicium paraît abaisser légèrement a_{r2} de 725°-710° à 710°-700°, mais l'effet est peu marqué.

M. *Osmond* rappelle que le point a_{r2} paraît représenter la fin de a_{r3}, c'est-à-dire la transformation allotropique du fer pour les molécules placées sous la dépendance du carbone.

3° — *Point* a_{r1}. — Le silicium relève progressivement a_{r1}, si bien que a_{r2} et a_{r1}, suivant les types d'aciers considérés, arrivent à coïncider. Cette action est analogue à celle du chrome et opposée à celle du manganèse, du nickel et du cuivre.

Il ne semble pas que le silicium soit allié au fer et forme avec lui ou avec les autres corps des composés définis ; on n'enregistre aucun dégagement de chaleur brusque et marqué, pouvant correspondre à la solidification d'une partie fondue, comme cela a lieu pour les fontes. Néanmoins, nous ne devons accepter qu'avec réserve le résultat ci-dessus, étant donné les faibles teneurs en manganèse ou autres corps des échantillons soumis aux expériences.

E. — *Influence nuisible de certains corps.* — Nous ne signalerons que le *phosphore* et le *soufre*.

Le *phosphore* entre en combinaison avec les carbures de fer constitutifs de l'acier, abaisse leur point de fusion et les rend fragiles à froid. Cette fragilité se communique à toute la masse de l'acier. C'est là surtout ce qui le rend nuisible, particulièrement dans les aciers très carburés.

Un acier extra doux à 0,1 0/0 (*1 millième de C*) peut à la rigueur supporter 0,4 de P*h*, mais un acier mi-dur à 0,4 0/0 de C ne doit pas en contenir 0,1 0/0.

Les ingénieurs de *Terrenoire* avaient cru pouvoir, avant la déphosphoration, utiliser des aciers phosphoreux à la condition de n'avoir que de très faibles teneurs en C. L'expérience leur apprit qu'aucun pacte ne saurait être passé avec cet ennemi de la métallurgie du fer.

La fragilité apportée par P*h* dans les aciers démontre une fois de plus la nécessité des essais au choc. On peut, en effet, obtenir des résultats excellents en essayant à la traction un acier très phosphoreux et si l'on s'en tenait à ces seuls renseignements, on se tromperait très fort sur la valeur industrielle du métal. Les essais au choc complètent les données des épreuves de traction et rétablissent la vérité. Les aciers phosphoreux montrent une structure particulière, schisteuse, en lamelles, facilement reconnaissable dans les éprouvettes d'essai qu'on prend au cours d'une opération *Bessemer* basique.

Le *soufre* rend l'acier rouverin, c'est-à-dire cassant à chaud. Il se combine en partie avec C, N*i*, M*n* dont il tend à neutraliser les effets bienfaisants.

La présence du soufre est donc toujours nuisible et on doit en éviter avec soin l'incorporation. Malheureusement, il est introduit dans l'acier soit par les minerais eux-mêmes qui n'en sont jamais exempts, soit par les combustibles solides ou gazeux qu'on emploie pour la production des fontes ou des aciers.

Les foyers d'affinerie et les hauts-fourneaux au bois donnaient autrefois des produits de choix en partant de minerais purs : aujourd'hui les anciens procédés sont presque partout abandonnés comme étant trop coûteux, on préfère lorsqu'on veut des produits purs les désulfurer en les traitant au cubilot *Rollet*.

Aperçu final sur les théories actuelles.

Parmi les théories existantes, la théorie allotropique nous paraît mon-

trer le mieux la signification des phénomènes de la trempe. Une autre théorie longtemps admise, acceptée encore par de nombreux métallurgistes, est celle *dite du carbone*. Cette dernière regarde le *maintien du carbone de trempe comme la cause directe de la trempe*. Nous savons, d'autre part, que la théorie allotropique n'y voit qu'une cause indirecte.

A côté de la théorie *du carbone* il faut placer celle du *carbure trempant de fer 3* enseignée par le professeur *Howe*. Dans cette théorie dite carbo-allotropique, le carbone peut encore agir comme un frein pour retarder la transformation du fer 3 en fer α et cela même serait la suite naturelle de la puissante affinité chimique que posséderait le fer 3 pour le carbone de trempe. Le retard de la transformation du fer 3 sous l'influence du carbone ne crée-t-il pas une forte présomption pour croire que les deux corps étaient combinés? (*Howe*). Les phénomènes de la trempe ne seraient ainsi attribués ni au fer 3 seul, ni au carbone de trempe, mais à un composé de carbone et de fer 3 appelé *carbure trempant de fer 3*.

Rien dans ce qui précède ne saurait gêner la théorie allotropique, car la création de ce carbure de fer 3 répond à l'idée de pouvoir expliquer certaines anomalies rencontrées dans les aciers spéciaux en lui attribuant les propriétés nécessaires indispensables. L'exposé de l'histoire générale des aciers au carbone trempés, des aciers manganèse et des aciers nickel à l'aide de la théorie allotropique nous paraît la meilleure preuve en sa faveur, *en l'état des faits constatés jusqu'ici*. La théorie du carbone à peine suffisante pour les aciers exclusivement carburés ne peut satisfaire pour la trempe des aciers extra-doux : elle ne saurait être conservée lorsqu'on considère les aciers manganèse et les aciers nickel.

La théorie allotropique *synthétise les faits dominants et généraux* de l'histoire des aciers, mais elle n'exclut pas les théories *spéciales nécessaires* pour l'explication des faits particuliers, ainsi que l'a fort justement fait remarquer M. *Osmond*. Le carbone présente, dans ses rapports avec le fer, un certain nombre de particularités inséparables de sa présence : la théorie allotropique pourra se ramifier un jour pour expliquer ce chapitre désormais spécial. Il pourra en être de même pour les corps déjà nombreux dont l'influence a été étudiée plus haut.

L'ancienne théorie *dite du fer 3*, non condamnable en elle-même *mais incomplète* par défaut de précision, avait donné lieu à un certain nombre

d'objections bien fondées en principe et que la théorie actuelle plus parfaite lève sans difficultés.

Si le fer β, dur et non magnétique, est tout à la fois la cause des propriétés des aciers au carbone trempés et de celles des aciers M*n*, ces derniers non magnétiques ne doivent avoir que du fer β tandis que les aciers au carbone trempés fortement magnétiques n'en peuvent contenir qu'une partie de leur masse. On a conclu par suite que les aciers manganèse devraient être au moins aussi durs que les aciers au carbone trempés et, en fait, ils le sont beaucoup moins (*Sauveur*, *Howe*, etc...)

La théorie nouvelle répond que les aciers manganèse qui n'ont pas de transformations ne contiennent que du fer γ par définition, tandis que les aciers au carbone trempés qui ont traversé des transformations partielles doivent leur dureté au fer β.

On a dit aussi :

Si l'absence de magnétisme est dû au fer dur β, quand un acier nickel non magnétique à la température ordinaire le devient (*après refroidissement à — 40° par exemple*), le métal devenu magnétique devrait être moins dur que le métal non magnétique et c'est le contraire qui a lieu. On répond à cela que le métal non magnétique ne contient que du fer γ, la transformation vers — 40° restant incomplète avec formation de fer β et de fer α.

Mais il est encore un vaste champ ouvert aux recherches; c'est celui de l'étude approfondie des propriétés magnétiques des aciers. Ainsi qu'on l'a vu, le magnétisme a sa part contributive dans la théorie générale des métaux ferreux.

Déjà, la voie est tracée; sans sortir des limites que nous nous sommes imposées, nous pouvons signaler les remarquables travaux de Mme *Sklodowska Curie* résumés dans un mémoire publié par la *Société d'Encouragement*.

Dans ce mémoire sont examinées l'influence de la composition chimique des aciers sur leurs propriétés magnétiques et la manière dont ces propriétés sont modifiées par les conditions de trempe.

Nous ne pouvons citer que quelques résultats; il serait prématuré, en effet, dans un traité didactique, de s'étendre trop longuement sur une question encore si nouvelle.

Les éléments mesurés ont été :

1°) Le moment magnétique total du barreau;

2°) Le flux d'induction qui traverse la section droite du barreau en son milieu ;

3°) Le champ coercitif.

Les barreaux en expérience étaient constitués par des aciers à divers pourcentages en carbone et par des aciers spéciaux (*au manganèse, au chrome*, etc...)

La température de transformation magnétique n'est pas absolument brusque et semble s'étaler sur un certain nombre de degrés ; il y a lieu de considérer, d'autre part, la température de transformation magnétique par échauffement et la température de transformation magnétique par refroidissement.

Pour prendre la trempe, l'acier doit être trempé quand il est à l'état faiblement magnétique à haute température.

Les nombreux résultats d'expériences publiés dans des tableaux synoptiques concernant des types d'aciers très variés confirment et complètent d'une façon remarquable les théories que nous avons exposées.

Les créateurs de la théorie cellulaire peuvent mesurer aujourd'hui le chemin parcouru depuis leurs premiers travaux ; ils ont posé les bases d'une science qui a rendu d'immenses services à l'industrie. Née d'hier, la métallographie microscopique se signale déjà par une extraordinaire fécondité ; analysant les diathèses et les maladies des métaux, elle conduira les métallurgistes et les constructeurs à perfectionner les moyens de les éviter ou de les guérir.

L. Gages.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME II

Avant-propos 5
Préliminaires. — La mesure des hautes températures 7
Article 1er. — Méthodes fondées sur les propriétés des gaz 7
A. — Le thermomètre à air 7
B. — Méthode indiquée par M. Daniel Berthelot 9
Article 2. — Méthodes fondées sur les propriétés des solides . . . 10
I. — Moyens pyroscopiques 10
A. — Couleurs de chauffage 10
B. — Alliages fusibles. 12
II. — Appareils industriels 13
1° Lunette polarimétrique de MM. Mesuré et Nouel 13
A. — Rappel des principes de la polarisation rotatoire . . . 13
a) Définition du phénomène 14
b) Loi de Biot 14
c) Cas d'une lumière composée 14
B. — Description de la lunette polarimétrique 14
C. — Théorie de l'appareil 15
2° Pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier . . . 17
A. — Description de l'appareil employé 17
B. — Points fixes de la graduation 18
C. — Des métaux à adopter pour le couple 19
D. — Loi de variation de la force électro-motrice avec la température 20
3° Pyromètre optique de M. H. Le Chatelier. 21
A. — Coup d'œil rétrospectif sur les procédés optiques. . . 21
B. — Des difficultés d'emploi des appareils basés sur la mesure des variations de nuances 22
C. — Exposé de la méthode optique de M. H. Le Chatelier . 23
a) Description et fonctionnement général du photomètre . 23
b) Détails sur la manière d'opérer 24
c) Graduation 25

TITRE I. — TRAVAIL DE LA FONTE

LE MOULAGE

Préliminaires 29
CHAPITRE Ier. — APPAREILS DES FONDERIES. 30
Article Ier. — Fonderies de première fusion 30
A. — Marche en première fusion pour moulage. 30
B. — Marche en première fusion pour saumons ou gueusets. . 31
Article 2. — Fonderies de deuxième fusion 32
I. — Les cubilots 33
A. — But et organisation générale d'un cubilot 33
B. — Réactions caractéristiques qui s'effectuent dans le cubilot 34
C. — Organisation d'un cubilot et de ses accessoires . . . 35
a) Dimensions. 35
b) De l'air nécessaire à la combustion 37
D. — De quelques types de cubilots. 38
1° Cubilot Woodward 39
2° Cubilot Krigar 40
3° Cubilot Herbertz 40
E. — Comparaison des cubilots à jet de vapeur et des cubilots à vent soufflé 42
II. — Des fours à réverbère 43
A. — Motifs de leur emploi 44
B. — Des types de fours employés 44
C. — Chargement et conduite des fours. 46
III. — Les creusets 47
A. — Fours à creusets ordinaires 47
B. — Fours Piat 48
Article 3. — Autres appareils ou accessoires des fonderies 49
I. — Des poches de fonderie 49
II. — Les étuves 51
CHAPITRE II. — PRATIQUE DU MOULAGE. 53
Article 1er. — Construction des modèles. 53
A. — Généralités sur les modèles en bois 53
B. — Du retrait. 53
C. — De la dépouille 54
D. — Modèles en métal, plâtre, etc. 55

Article 2. — Moulage en sable et en terre 56
I. — De la matière réfractaire constituant le moule 56
A. — Moulage en sable 56
a) Sable vert 57
b) Sable sec 57
c) Sable recuit ou étuvé 57
B. — Moulage en terre 58
II. — Des châssis. 59
A. — But et description des châssis 59
B. — Moulage à découvert 60
III. — Les noyaux. 61
A. — Lanternes 61
B. — Axes 62
C. — Boîtes à noyaux. 62
IV. — Les planches à trousser 63
V. — Description de quelques cas simples 65
A. — Moulages avec des châssis 65
B. — Moulage en terre proprement dit 66
a) Etablissement du noyau 67
b) Etablissement de la fausse pièce 67
c) Etablissement de la chape. 67
C. — Machines à mouler ou moulage mécanique 69
Article 3. — Moulage en coquille 70
I. — Définition 70
II. — Des conditions de la trempe 71
III. — Procédés de fabrication 71
A. — Cas d'un cylindre de laminoir 72
B. — Cas d'un voussoir de coupole 73
C. — Cas des roues. 74
D. — Autres cas. 75
Article 4. — De la coulée 75
I. — Coulée proprement dite 76
II. — Des évents 77
III. — Des masselottes 77
IV. — Défauts des pièces coulées 78
A. — Gouttes froides 78
B. — Reprises, cendrures, etc. 78
C. — Soufflures, piqûres, etc. 79
V. — Opérations finales 80
CHAPITRE III. — FABRICATION DE LA FONTE MALLÉABLE. 81
I. — Définition 81

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]
[illegible]
[illegible]

II. — Défauts accidentels 120
A. — Définition des tapures 120
B. — Tapures par réchauffage 120
C. — Tapures par refroidissement. 121
D. — Recherche des tapures 122
III. — Structure physique. 123
A. — Notions générales 123
B. — Genèse de la cristallisation 124
1° Formation du cristal. 124
2° Relations des cristaux les uns avec les autres. 125
a) Perturbation des axes 126
b) Relation des cristaux déjà formés avec le métal encore liquide. 127
c) Couches extérieures des lingots. 127
3° Cristaux des soufflures. 158
C. — Moyen proposé par Tchernoff pour améliorer la structure. 129
Article 3. — Les aciers coulés sans soufflures 130
I. — Les procédés chimiques 131
A. — Quelques mots sur l'usine de Terrenoire. 131
B. — Genèse de la fabrication des aciers sans soufflures . . . 132
1° Historique de la fabrication à l'étranger. 132
2° Origine de la fabrication à Terrenoire 133
C. — Théories proposées 134
1° Théorie de la réaction 134
a) On croit tout d'abord que CO est l'unique gaz des soufflures 134
b) M. Ferd. Gautier explique au Congrès de l'Iron and Steel le rôle du silicium. 135
2° Théorie de la dissolution 135
3° Pourquoi les aciers étrangers n'étaient-ils pas souffleux ? . 136
4° Action de l'aluminium. 137
a) Historique de la fabrication. 137
b) Explication de M. Ostberg de Stockholm. 137
c) Pratique de l'addition d'aluminium 138
5° Les explications de M. U. Leverrier. 139
6° Expériences sur la dissolution des gaz dans les fontes et les aciers 140
a) Expériences de MM. Troost et Hautefeuille. 140
b) Expériences du professeur Muller 141
D. — Des moulages d'acier 141
1° De la qualité de l'acier 141

2° Moulage et modelage 142
3° Traitement des pièces moulées 143
4° Considérations d'ordre économique 144
II. — Procédés mécaniques 145
A. — Historique du procédé par compression 145
B. — Description des appareils employés 146
1° Lingotières pour acier comprimé 146
2° Presses à comprimer 147
3° Phases du phénomène 148
4° Effets et avantages de la compression. 149

TITRE III. — TRAVAIL DE L'ACIER

LA PRATIQUE ET LA THÉORIE

Première partie. — Pratique du travail

CHAPITRE I. — Transformations mécaniques à chaud 151
Article 1er. — Le forgeage 151
I. — Le forgeage au marteau-pilon 152
A. — Quelques mots d'historique 152
B. — Le réchauffage des lingots 153
1° Types divers de fours à réchauffer. 153
2° Précautions à prendre dans la conduite du réchauffage . . 158
C. — Quelques exemples de travail au pilon. 159
I. — Forgeage des pièces longues 160
a) Le martelage ou étirage. 160
b) L'étampage est la phase finale du forgeage 161
c) Des chaudes 162
d) Installation d'un pilon. 162
e) Précautions diverses à prendre. 163
II. — Forgeage sur mandrin pour pièces forées 166
III. — Forgeage des pièces en forme d'anneau. 168
IV. — Forgeages divers : étirage ou emboutissage, étampage . 170
a) Cas de l'étirage. 170
b) Cas de l'étampage. 171
V. — Remarques sur les poids des marteaux des pilons. . . 173
II. — Le forgeage à la presse 173
A. — Notions générales. 173
B. — Etude des presses à forger. 174

I. — Presses à course continue 175
II. — Presses à course partielle. 182
C. — Forgeage comparé au marteau-pilon et à la presse. . . 182
I. — Travaux exécutés à la presse 183
II. — Mise en parallèle des deux appareils 185
III. — Équivalence d'une presse et d'un pilon 187
IV. — Valeur des deux forgeages. 188
V. — Remarque relative aux presses de faible puissance . 189
Article 2. — Le laminage 190
Notions générales 190
I. — Le laminage ordinaire. 190
A. — Quelques mots sur l'action du laminoir 190
B. — Définition du laminoir. 191
I. — Classification des cannelures d'après leur formation par les deux cylindres 192
II. — Classification des cannelures d'après la forme de leur section. 193
C. — Produits obtenus. 194
I. — Lingots pour barres ou pièces de forge 194
II. — Lingots pour tôles. 198
III. — Remarque sur les dispositifs spéciaux. 200
II. — Les laminages spéciaux 202
A. — Procédé Mannesmann pour tubes métalliques 202
B. — Procédé du laminage pour chaînes. 204
C. — Laminage de la tôle en feuilles continues en partant de l'acier liquide 208
D. — Laminage circulaire 208
E. — Laminoirs à roues, etc. 209
Article 3. — Digression sur le travail des métaux misés 210
A. — Notions générales sur la confection des paquets 210
B. — Paquets pour profilés divers. 213
C. — Paquets pour tôles. 214
D. — Fabrication des roues en fer forgé par étampage. 215
1° Préparation des éléments de la roue 215
a) Jante 215
b) Rayons 216
c) Moyeu 216
2° Assemblage des éléments à froid. 216
3° Matriçage à chaud 216
4° Finissage 216
Article 4. — Recuit après forgeage. 217

A. — Définition du recuit 217
B. — Fours à recuire. 217
C. — Conduite du recuit. 220
D. — Recuits spéciaux 220
CHAPITRE II. — La trempe. 222
Article 1er. — Effets produits par la trempe 223
I. — Trempes positives 224
II. — Trempes négatives 225
III. — Modifications d'équilibre produites par la trempe proprement dite 226
Article 2. — Pratique de la trempe 228
I. — Réchauffage pour la trempe 228
II. — Liquides employés pour la trempe 233
A. — Emploi de l'huile. 233
B. — Emploi de l'eau. 234
C. — Quelques citations par M. Osmond 235
D. — Trempes très vives et très douces. 236
III. — De quelques trempes spéciales 237
A. — Trempe intérieure 237
B. — Double trempe 238
C. — Trempe par compression 240
D. — Trempe après cémentation. 241
E. — Notions complémentaires sur les plaques Harvey . . . 243
Article 3. — Le revenu ou recuit après trempe. 243
I. — Pratique et but du revenu. 244
II. — Trempe et revenu des outils et petites pièces. 245

Deuxième partie. — Théorie du travail

CHAPITRE I. — Travaux de Tchernoff 250
Article 1er. — Diagramme de Tchernoff. 251
Article 2. — La théorie du forgeage 253
I. — Forgeage au-dessus de *b* 253
II. — Forgeage au-dessous de *b*. 254
CHAPITRE II. — Théorie cellulaire des propriétés de l'acier 255
Article 1er. — Structure cellulaire de l'acier 256
I. — Procédés d'investigation 256
A. — Examen microscopique des cassures 256
B. — Méthode Weyl 257
1° Cas d'un acier non trempé. 257

2° Cas d'un acier trempé 258
C. — Méthode des lames minces 258
D. — Méthode de l'attaque des sections polies par l'acide azotique. 258
E. — Conclusions 260
II. — Genèse des cellules. 261
A. — Genèse de la cellule simple 261
B. — Genèse des cellules composées 261
III. — Analyse immédiate de la cellule simple 263
IV. — Cause possible des changements d'état du carbone 264
Article 2. — Des changements d'état du fer 265
I. — Expériences fondamentales 265
II. - Propriétés du fer α et du fer β 266
Article 3. — Le travail de l'acier et la théorie cellulaire 267
I. — Les effets du recuit. 267
II. — Effets du forgeage 269
III. — Effets de la trempe et du revenu après trempe 269
IV. - Remarque sur la position des points *b* et *c* 270
V. — Effets de l'écrouissage. 272
CHAPITRE III. — EXPOSÉ PLUS PRÉCIS DES TRANSFORMATIONS DU FER ET DU CARBONE CONDUISANT A LA THÉORIE DE LA TREMPE 273
Article 1er. — Expériences fondamentales 273
I. — Polymorphisme du fer. 273
II. — Récalescence. Changement d'état du carbone 275
Article 2 — Travaux de M. Osmond 275
I. — Méthode expérimentale 275
II. — Résultats d'expériences 276
III. - Théorie allotropique de la trempe 278
A. — Causes de la trempe 278
B. - Est-ce à la présence du fer β ou à celle du carbone de trempe qu'il faut attribuer les propriétés caractéristiques des aciers trempés ? 278
C. — Comment les trempes négatives se relient-elles aux trempes positives? 281
D. -- Quelques mots sur la théorie du revenu 282

TITRE IV. — ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES DIVERS ACIERS

LES THÉORIES FINALES

CHAPITRE 1er. — ESSAIS DES MÉTAUX 284
Article 1er. — Essais de traction 285
I. — Valeur de l'essai de traction 285
II. — Formes des barreaux 285
III. — Machines de traction 287
A. — Machines à levier 287
1° Machine à levier simple à plateau 288
2° Romaine 288
3° Romaine à leviers multiples 289
B. — Machines à manomètre 290
1° Machine Thomasset 290
2° Machine Maillard 291
IV. — Pratique des essais de traction 292
A. — Préliminaires 292
B. — Résultats généraux des épreuves de traction 293
Première période dite élastique 293
Période de déformation 294
De la striction 295
Allongements 295
C. — Représentation graphique. 296
Article 2. — Autres essais à froid usuels 298
I. — Essais de choc. 298
II. — Essais de flexion. 301
III — Essais divers. 304
A. — Aciers à outils 305
B. — Essais hydrauliques. 305
C. — Essais à la poudre 305
Article 3. — Notions complémentaires sur les essais mécaniques . 305
I. — Existe-t-il une limite d'élasticité? 305
II. — De l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des aciers 307
a) Influence des températures supérieures à 100° 307
b) Influence des températures inférieures à 100° 309
c) Influence des variations de la température atmosphérique . 310
III. — Influence de la durée sur les résultats des essais des métaux. 311
Article 4. — Essais à chaud. 311

I. — Fer puddlé 312
A — Crochets 312
B. — Rabattements, perçage avec rabattement 312
C. — Emboutissages, pliages à chaud, soudure 313
II. — Acier 315
CHAPITRE II. — RAPPORTS EXISTANT ENTRE LA COMPOSITION CHIMIQUE ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ACIERS. 315
Notions préliminaires 316
I. — Loi de Roberts-Austen 316
II. — Sur la classification périodique de Mendéléeff 316
III. — M. Osmond confirme pour le fer la loi de Roberts-Austen . 319
Article 1er. — Aciers au carbone 321
I. — Données pratiques 321
A. — Essai de traction 322
1° Cas du métal recuit 322
2° Explication des résultats précédents par la théorie cellulaire 323
3° Cas du métal trempé, comprimé ou écroui 324
4° Conséquences au point de vue de l'emploi des aciers dans les constructions 325
B. — Valeur des autres essais par rapport à celui de traction . 327
II. — Constituants primaires des aciers au carbone 330
A. — Définition et historique de la métallographie microscopique 330
B. — Mode opératoire de l'analyse micrographique. 331
C. — Nature des constituants des aciers au carbone 332
1° Ferrite (M. Howe) 333
2° Cémentite (M. Howe) 333
3° Sorbite (M. Sorby) 333
4° Martensite (M. Osmond) 334
5° Troostite (M. Osmond) 334
D. — Genèse de la formation des constituants 335
1° Digression sur les alliages eutectiques 335
2° Courbes de fusibilité des aciers 336
Article 2. — Aciers spéciaux de la 1re série de Roberts-Austen . . 339
I. — Aciers manganèse 339
A. — Influence du manganèse sur les propriétés des aciers au carbone. 339
1° Traction 340
2° Flexion et chocs 340
3° Rôle général du manganèse 341
B. — Aciers manganèse proprement dits 341
II. — Aciers nickel 346

A. — De 0 à 5 0 0 de nickel 347
B. — De 5 à 20 0/0 de nickel. 348
1° Aciers de 5 à 7 0 0 de nickel 349
2° Aciers de 10 à 20 0 0 de nickel 349
C. — De 20 à 25 0/0 de nickel 350
D. — Points de transformation des aciers nickel (M. Osmond) . 352
III — Comment, avec les faits actuellement acquis, la théorie rend-elle compte des propriétés des aciers au carbone, au nickel et au manganèse?. 354
A. — Courbes de refroidissement 354
B. — Des trois états du fer : α, β et γ 355
C. — Sur le point de Ball. 357
D. — Permanence des formes allotropiques 358
E. — Classification générale des aciers au carbone, au nickel et au manganèse. 360
IV. — Aciers au cuivre 363
V. — Aciers au bore. 364
Article 3. — Aciers spéciaux de la deuxième série de Roberts-Austen 364
I. — Aciers au chrome 365
A. — Propriétés des aciers chromés à chaud 365
B. — Qualités de résistance des aciers chromés. 366
C. — Travail à froid 367
D. — Théorie de l'action du chrome 367
1° Action directe du chrome 367
a) Position des points ar_3, ar_2 et ar_1 367
b) Etude de la structure 368
2° Composés, fer, carbone, chrome 368
E. — Types d'aciers chromés 369
II. — Aciers au tungstène, à l'aluminium, au silicium, au molybdène, etc 369
A. — Aciers au tungstène 369
B. — Aciers à l'aluminium 373
C. — Aciers au molybdène 374
D. — Aciers au silicium 375
E. — Influence nuisible de certains corps 376
Aperçu final sur les théories actuelles 377

DIJON. — IMPRIMERIE DARANTIERE

NOV 17 1936